

УДК 681.3.01

ІНФОРМАЦІЙНІ МІРИ РОЗРАХУНКУ ТА РОЗРЯДНІСТЬ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНТРОПІЙНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИТРАТИ ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ

С. І. Мельничук, І. З. Мазурик

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел. (8-03422) 4-60-77

Проаналізовано різні моделі інформаційних мір розрахунку оцінок ентропії та особливості реалізації опрацювання вимірювальної інформації на їх основі. Проведені теоретичні дослідження та моделювання в чисельному експерименті, за якими встановлено нечутливість оцінок ентропії випадкових вимірювальних сигналів до дрейфу нуля амплітуди первинного перетворювача. Досліджено вплив розрядності аналого-цифрових перетворювачів на похибку вимірювання витрати газових середовищ за оцінками ентропії шумів потоку. Такий підхід дозволяє розширити інформаційні міри, за яким здійснюється оцінювання характеристик контрольованих параметрів, що в свою чергу дозволяє спростити апаратну реалізацію цифрових засобів вимірювання а також покращити метрологічні характеристики шляхом усунення додаткової похибки, зумовленої дрейфом нуля амплітуди первинних перетворювачів.

Ключові слова: ентропія, дрейф нуля, вимірювання, витрата газу, похибка, розрядність аналого-цифрового перетворювача.

Проанализировано различные модели информационных мер для расчета оценок энтропии а также особенности обработки измерительной информации на их основе. Проведены теоретические исследования и моделирование в численном эксперименте что позволило установить нечувствительность оценок энтропии случайных измерительных сигналов к дрейфу нуля амплитуды первичного преобразователя. Исследовано влияние разрядности аналого-цифровых преобразователей на погрешность измерения расхода газовых сред по оценкам энтропии шумов потока. Такой подход позволяет расширить информационные меры, по которым осуществляется оценка характеристик контролируемых параметров, в свою очередь позволяет упростить аппаратную реализацию цифровых средств измерения а также улучшить метрологические характеристики путем устранения дополнительной погрешности, обусловленной дрейфом нуля амплитуды первичных преобразователей.

Ключевые слова: энтропия, дрейф нуля, измерения, расход газа, погрешность, разрядность аналого-цифрового преобразователя.

Different information measures calculate estimates of entropy and the peculiarities of processing of measuring information based on them. Theoretical studies and numerical modeling experiments that established insensitivity of entropy estimates of random measurement signals to the drift of zero amplitude of the primary converter, the influence of bit analog-digital converters for measurement error costs gas atmospheres estimated entropy flux noise. This approach allows to extend the measure by which information is controlled evaluation of performance parameters, which in turn simplifies hardware implementation of digital measuring and improving the metrological characteristics by eliminating additional errors due to drift of zero amplitude of the primary converters.

Keywords: entropy, zero drift, measurement, gas consumption, error bit analog-digital converter.

Сучасні інформаційні засоби перетворення та обробки вимірювальних даних ґрунтуються на використанні методів, що в той чи інший спосіб впливають на параметри потоку контрольованого середовища. Такий підхід приводить до зниження експлуатаційної надійності, недостатнього запасу точності, а

також складного конструктивного виконання і, як наслідок, значної вартості таких пристроїв. Крім того, доцільно зазначити наявність дрейфу нуля сенсорних елементів перетворювача, який приводить до погіршення метрологічних характеристик і є додатковим джерелом похибок [1, 2].

При використанні безконтактних методів вимірювання, зокрема із застосуванням статистичних оцінок шумів потоку вимірюваного середовища, зумовлених переміщенням вздовж вимірювальної ділянки, усувається ряд вище наведених недоліків. Крім того, отримування інформації про витрату газу на основі пасивного моніторингу статистичних характеристик потоку дозволяє уникнути додаткових енергетичних затрат при вимірюванні витрати контрольованого середовища [3].

Метою статті є вивчення впливу різних моделей інформаційних мір розрахунку оцінок ентропії інформаційних вимірювальних засобів, що ґрунтуються на використанні імовірнісної складової статистичних характеристик випадкових процесів, зумовлених зміною витрати газового середовища [4]. З урахуванням того, що сенсорні елементи перетворювачів вказаного типу реалізуються на основі напівпровідникових інтегральних схем, доцільно провести дослідження впливу дрейфу нуля амплітуди вимірювального сигналу на результати вимірювання. Крім того, необхідно дослідити вплив особливостей апаратної реалізації засобів представлення вимірювальної інформації, зокрема, розрядності аналого-цифрового перетворювача (АЦП), яка визначає кількість можливих станів вимірювального сигналу і, як наслідок, адекватність розрахунку оцінок ентропії.

Як відомо, вимірювання витрати газу за ентропійними оцінками шумів потоку можливе завдяки тому, що при переміщенні вздовж вимірювальної ділянки нестационарні складові швидкості потоку в приграничних шарах навколо формуєвачів сигналів або в зонах змішування складових потоку приводять до неперервного утворення завихрень та збільшенню турбулентності потоку. При цьому внаслідок стискуваності газового середовища частина енергії потоку втрачається на формування шумів, які, в свою чергу, містять інформацію про витрату [4].

Неперервні акустичні коливання, що утворюються контрольованим середовищем на вимірювальній ділянці при проходженні вздовж формуєвача сигналів за допомогою перетворювача акустичних коливань трансформуються в аналоговий електричний сигнал $S(n)$, що передається на цифровий засіб опрацювання, який включає в себе підсилювач, АЦП, цифровий фільтр та обчислювач витрати. В АЦП формуються послідовні цифрові інформаційні пакети на основі одиничних перетворень амплітуди сигналу S_j . Сигнал у вимірювальному каналі є неперервним, але при

вимірюванні витрати перетворюється і опрацьовується у цифровому представленні. Кількість станів сигналу обмежується розрядністю перетворювача. В даному випадку під станом сигналу слід розуміти його квантовані значення. Далі інформаційні пакети обробляються в числовому обчислювальному пристрої. Після цього здійснюється розрахунок оцінок ентропії послідовних фрагментів в обчислювачі, значення яких пропорційні до поточної витрати контрольованого середовища [5].

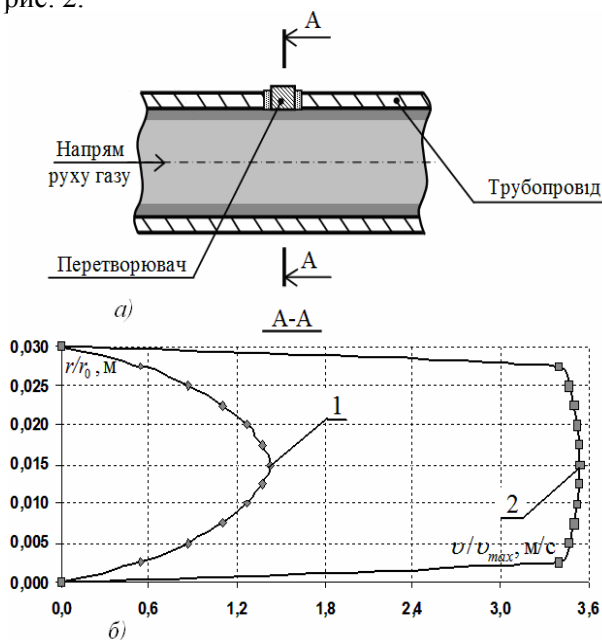
Для підвищення точності методу вимірювання витрати за шумами зі змінною ентропією доцільно вивчити основні джерела виникнення таких випадкових сигналів в потоці газу і їх спектральні та статистичні характеристики. Основним джерелом інформації про миттєву витрату для запропонованого в [4] засобу вимірювання при ламінарному режимі руху є пульсації тиску, які створені нестабільністю переміщення контрольованого середовища, на які накладаються завихрення, зумовлені тертям до стінок трубопроводу (рис. 1, а), які виникають при наближенні режиму потоку до турбулентного. При переході на турбулентний режим потужність акустичних коливань суттєво зростає за рахунок завихрень, що виникають вздовж всієї довжини вимірювальної ділянки.

З метою оцінювання швидкостей руху вимірювального середовища в різних точках поперечного перерізу замірної ділянки для запропонованого в [4] підходу побудовано епюри швидкостей з врахуванням режиму протікання за значенням числа Re для витрат $1,87 \text{ м}^3/\text{год.}$ та $7,84 \text{ м}^3/\text{год.}$ (рис. 1, б).

При турбулентному русі газового середовища, який завжди супроводжується появою поперечних складових швидкості, що викликають перемішування середовища у всьому потоці, відбувається різке зростання опору руху середовища. При шорсткій поверхні стінки обтікання виступів відбувається з відривом потоку і коефіцієнт опору в цьому випадку залежатиме ще й від відносної шорсткості [3, 7]. Крім того, перехід до турбулентного режиму з більш шорсткою стінкою трубопроводу настає при меншому числі Re .

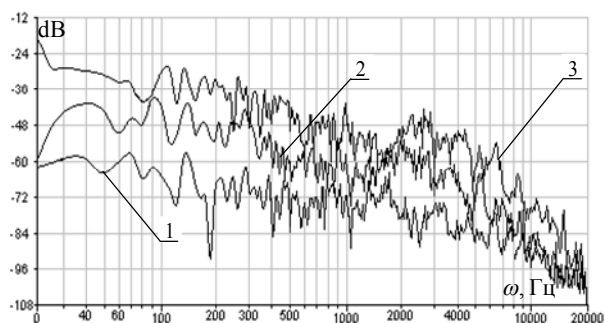
З огляду на випадковий характер шумів потоку газу необхідно проведено аналіз спектральних складових інформаційно-вимірювального сигналу. Результати експериментальних досліджень (на базі стаціонарної дзвонівної установки ІВФ "Темпо" (м. Івано-Франківськ) з границею основної відносної похибки $\pm 0,15 \%$,

вимірювального трубопроводу з Dy 30 мм, температурою $20 \pm 0,5$ °С, надлишковим робочим тиском 1140 Па робочого середовища – повітря) для характерних витрат, що відповідають різним режимам протікання середовища подано на рис. 2.



1 – $1,87 \text{ м}^3/\text{год.}$ і 2 – $7,84 \text{ м}^3/\text{год.}$

Рисунок 1 – Формування акустичних коливань при переміщенні вимірюваного газового середовища (а) та епюри швидкостей для різних режимів протікання (б) витрат



1 – $1,87 \text{ м}^3/\text{год.}$; 2 – $5,87 \text{ м}^3/\text{год.}$; 3 – $9,89 \text{ м}^3/\text{год.}$

Рисунок 2 – Зміна потужності вимірювальних сигналів зі зміною частотного спектру для витрат

З рис. 2 видно, що потужність вимірювального сигналу для витрати $1,87 \text{ м}^3/\text{год.}$ має розподіл близький до рівномірного в діапазоні

від 0 Гц до 10 000 Гц. Це свідчить про наявність значної кількості короткотривалих пульсацій тиску при ламінарному режимі протікання. Із збільшенням витрати потужність сигналу зростає непропорційно збільшенню частотного діапазону, зокрема зростання енергії в області низьких частот від 0 Гц до 1 000 Гц є більш інтенсивним порівняно з діапазоном від 1000 Гц до 20 000 Гц, що свідчить про суттєве збільшення енергії вихорів, зумовлених переходом в турбулентний режим протікання.

Опрацьований діапазон частотного спектру (0...20000 Гц, рис. 2), доцільно обмежити, оскільки сигнали з частотою понад 20 кГц характеризуються низькою потужністю і практично не змінюються при зростанні витрати, оскільки максимум потужності відповідає числу Струхала 0,3 [1, 3]. При великих числах Re ($>10^5$) вираженості обертонів вихрових частот взагалі не існує, а спектр вихрового звуку стає практично неперервним і частота Струхала є тільки мірою для представлення сигналу в такому спектрі частот. Тому можна вважати, що переміщення потоку створює широкопasmовий шум, що підтверджується дослідженнями [8], де рівні потужності звуку генерувалися в трубопроводах з різною формою поперечного перерізу при швидкості потоку повітря 12,5 м/с, причому спектр частот досліджуваного сигналу був в межах від 1000 Гц до 8000 Гц.

Графічну інтерпретацію експериментальних випадкових широкопasmових вимірювальних сигналів (шумів потоку) та відповідні оцінки ентропії, для витрати $5,87 \text{ м}^3/\text{год.}$ подано на рис. 3.

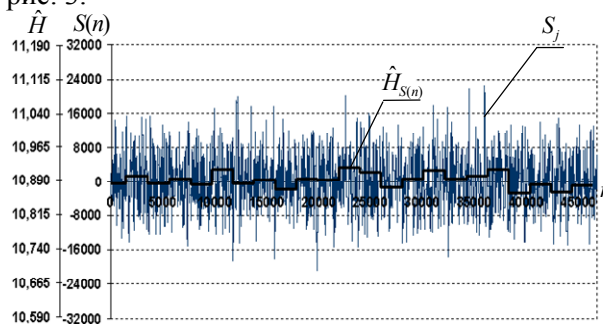


Рисунок 3 – Вимірювальний акустичний сигнал $S(n)$ з відповідними оцінками ентропії його послідовних фрагментів $\hat{H}_{S(n)}$

Подальше перетворення оцінок ентропії вимірювального сигналу у величину поточної витрати реалізується на основі функціональної залежності у вигляді неперервних дробів [5]:

$$Q = (\hat{H}^4 - 27,85 \cdot \hat{H}^3 + 245,22 \cdot \hat{H}^2 - 843,97 \cdot \hat{H} + 1212,59) / (-2,11 \cdot \hat{H}^3 + 68,87 \cdot \hat{H}^2 - 753,59 \cdot \hat{H} + 2698,12). \quad (1)$$

Слід зазначити, що дослідження впливу розрядності АЦП в такому випадку є актуальним завданням, в результаті вирішення якого можна оптимізувати обчислювальні та апаратні ресурси цифрових засобів опрацювання вимірювальних даних.

Однією з важливих метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки є дрейф нуля (ДСТУ 2681-94). Оскільки дрейф нуля зумовлений фізико-хімічними процесами, які приводять до різного роду спотворень параметрів сенсора і фактично не залежать від характеристик та режимів переміщення потоку, то це дозволяє розглядати вимірювальний сигнал, отриманий як сукупність окремих статистично незалежних джерел інформації. При вимірюванні витрати за шумами потоку має місце основна складова інформаційного сигналу $\hat{H}_{S(n)}$ – випадкові процеси з множиною станів обмежених розрядністю АЦП $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ і додаткова складова $\hat{H}_{D(t)}$ – відносно повільна (незмінна в ході одного вимірювання) зміна в часі характеристик чутливого елементу первинного перетворювача $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$.

В результаті ентропія такого сигналу може розглядатись як ентропія об'єднання двох інформаційних джерел $\hat{H}(S, D)$ з середньою кількістю інформації, що припадає на два довільних стани джерел S і D [6]:

$$\hat{H}(S, D) = - \sum_i \sum_j p(s_i, d_j) \log p(s_i, d_j). \quad (2)$$

При статистично незалежних появах станів джерел S та D ентропія їх об'єднання рівна сумі ентропії окремо взятих джерел:

$$\hat{H}(S, D) = \hat{H}(S) + \hat{H}(D). \quad (3)$$

Для основної складової вимірювального сигналу ентропія такого джерела визначається так:

$$\hat{H}_{sp\ S(n)} = - \sum_{j=1}^m p(S_j) \cdot \log_2(p(S_j)), \quad (4)$$

де $p(S_j) = \frac{n_j}{n}$ – відносна частота появи стану

S_j ; n_j – кількість значень вимірювального сигналу, що прийняв стан S_j .

Для додаткової складової, кількість можливих станів фактично обмежується одним, оскільки швидкість зміни параметрів сенсора настільки мала, що вони можуть вважатись незмінними в ході одного вимірювання. В такому випадку: $\hat{H}(D) = - \sum_i 1 \log 1 = 0$. В результаті на базі (3) отримуємо, що:

$$\hat{H}(S, D) = \hat{H}(S) + 0 = \hat{H}(S). \quad (5)$$

З метою перевірки такого твердження проведено ряд досліджень в чисельному експерименті, в ході яких модельовано вплив дрейфу нуля напруги первинного перетворювача U відліках АЦП (smpl) це складає $D = \{191, -153, 2881, -960, 4803\}$, що відповідно складає 10 %, 8 %, 15 %, 5 % та 25 % від максимуму амплітуди вимірювального сигналу для витрати контролюваного середовища 5,87 м³/год. Приклади експериментальних досліджень згаданих сигналів з коефіцієнтом зміщення (дрейфом нуля) +10 %, -8 %, +15 %, -5 % та +25 % подано на рис. 4.

З метою порівняння адекватності використання різних інформаційних мір ентропії розрахунки оцінок здійснювались з використанням таких формул [6]:

$$\text{дисперсії } H(A) = \log \sqrt{2 \cdot \pi \cdot e \cdot \sigma_x^2}, \quad (6)$$

де сталі коефіцієнти: $\pi=3,1415$, $e=2,71$; σ_x^2 – квадрат середньоквадратичного відхилення;

$$3\sigma - H(A) = \log 3 \cdot \sigma_x, \quad (7)$$

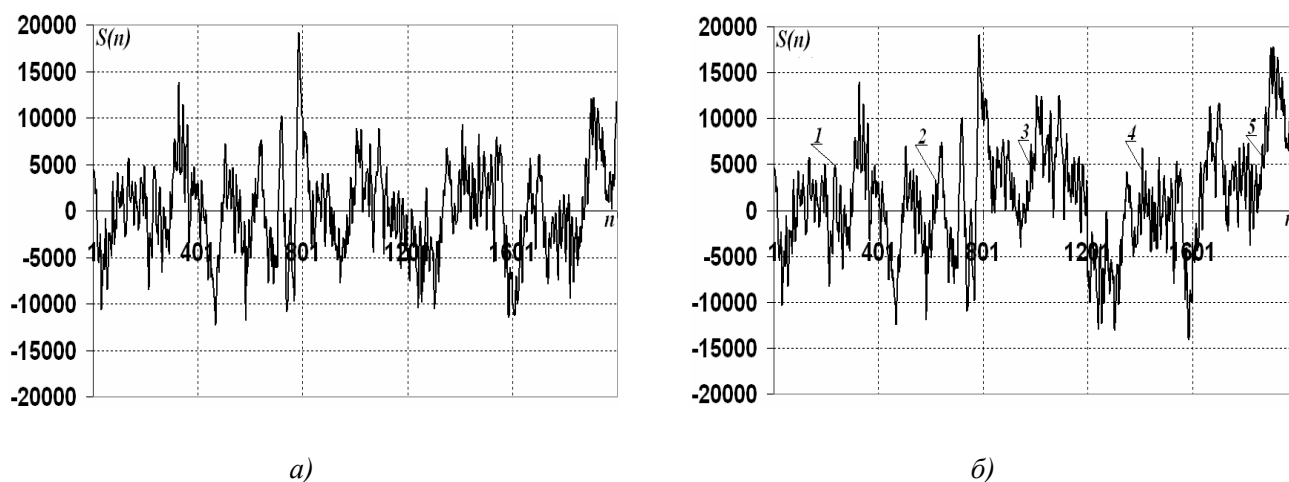
де σ_x – середньоквадратичне відхилення;

$$\text{Хартлі } \max H(A) = \log_2 K, \quad (8)$$

де $p(a)=1/k$ – ймовірність появи повідомлення a ; K – кількість рівноймовірних повідомлень джерела інформації;

$$\text{Шенона } H(A) = -k \sum_{i=1}^m P(a_i) \log_2 P(a_i), \quad (9)$$

де k - додатний коефіцієнт, що враховує основу логарифма; $P(a_i)$ – ймовірність того, що на виході джерела з'явиться стан a_i ; m – кількість можливих станів вимірювальної величини.



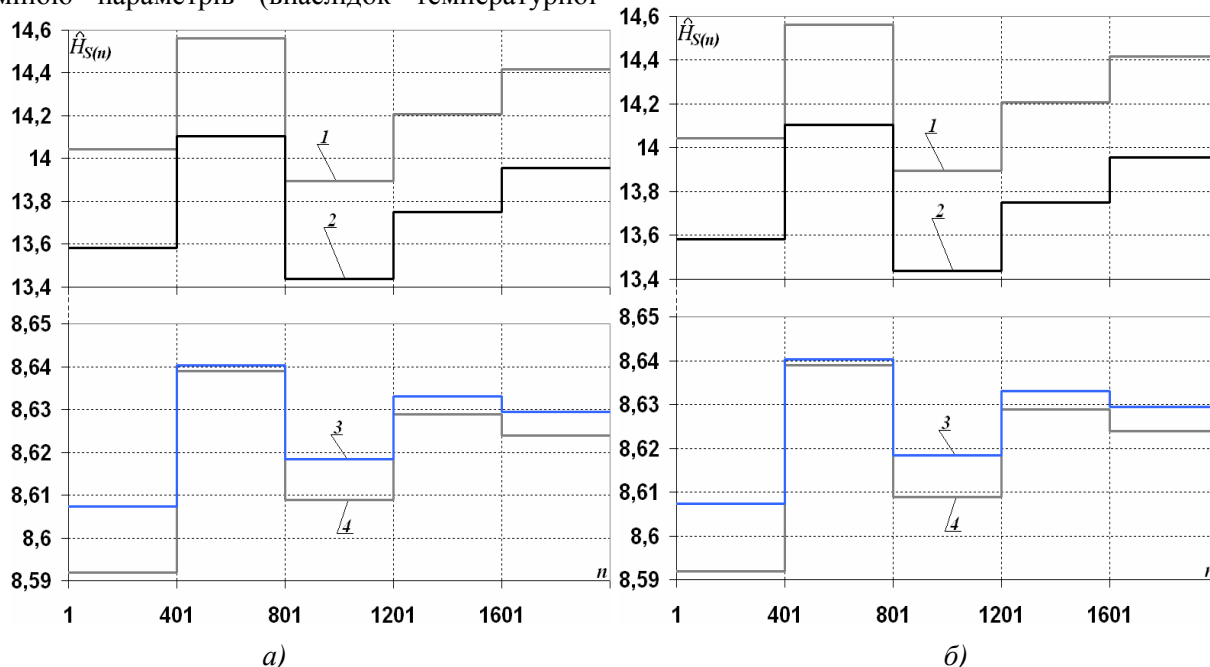
а – без зміщення; *б* – з дрейфом нуля; 1 – зміщення (+10%); 2 – зміщення (-8%); 3 – зміщення (+15%); 4 – зміщення (-5%); 5 – зміщення (+25%)

Рисунок 4 – Вимірювальний сигнал

В результаті проведених досліджень встановлено, що дрейф нуля амплітуди вимірювальних сигналів не впливає на оцінку ентропії їх послідовних фрагментів за умови постійної протягом одного вимірювання величини зміщення, а отже не приводить до виникнення додаткової похибки зумовленої зміною параметрів (внаслідок температурної

флуктуації, зношення, старіння елементів тощо) вимірювального перетворювача.

Аналого-цифрові перетворювачі є пристроями, які приймають вхідні аналогові сигнали і генерують відповідні їм цифрові представлення, придатні для обробки відповідними цифровими засобами.



а) – без дрейфу нуля; *б*) – з дрейфом нуля; 1 – ентропія за формулою дисперсії; 2 – ентропія за формулою 3σ ; 3 – ентропія за формулою Хартлі; 4 – ентропія за формулою Шенона

Рисунок 5 – Оцінка ентропії для вимірювального сигналу

Для контролю витрати за статистичними характеристиками шумів потоку використовується перетворювач акустичних коливань, за допомогою якого акустичні процеси (шуми), що утворюються в наслідок переміщення потоку замірною ділянкою, перетворюються в аналоговий електричний сигнал. В процесі вимірювання неперервні акустичні коливання перетворені давачем в електричний аналоговий сигнал, які в подальшому оцифровуються та опрацьовуються обчислювачем [5]. Такий метод дозволяє визначити величину витрати як функцію від статистичних характеристик випадкових коливань, які породжуються внаслідок переміщення контрольованого середовища.

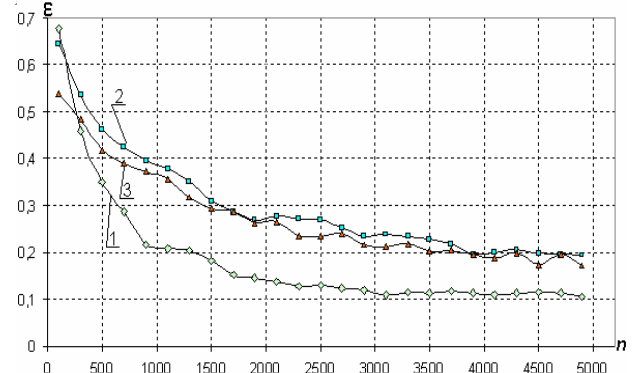
Доцільно зазначити, вказана реалізація практично забезпечує динамічне коригування методик обробки сигналу при відсутності матеріальних затрат на модифікацію апаратної частини, а також забезпечує алгоритмічну платформу для проектування обчислювача на базі ПЛІС (програмовані логічні інтегральні схеми). Крім того, габаритні розміри перетворювачів, які використано при реалізації та дослідженні, порівняно невеликі, що дозволяє здійснити відповідну мініатюризацію вимірювального комплексу в цілому. Фактично в процесі вимірювання здійснюється визначення величини зміни поточних оцінок статистичних характеристик (дисперсії, ентропії, спектральних характеристик) випадкових сигналів (шумів), які генеруються вимірюваним середовищем внаслідок зміни швидкості його переміщення, фізико-хімічних властивостей, температури, тиску тощо, а також наявністю зовнішніх та внутрішніх перешкод: акустичних, вібраційних тощо, які пропорційні до величини витрати вимірюваного середовища [2, 5].

Оскільки основним чинником, який впливає на ентропійну характеристику випадкових вимірювальних сигналів, є ймовірність появи окремих відліків оцифрованого сигналу в інформаційному пакеті, то в такому випадку одним з можливих чинників, що впливатимуть на адекватність опрацювання даних, може бути розрядність аналого-цифрового перетворювача а також вид розподілу випадкових шумових сигналів, які утворюються внаслідок руху контрольованого середовища.

З метою дослідження впливу апаратної реалізації цифрових пристроїв на точність вимірювання, зокрема, від розрядності аналого-цифрового перетворювача, проведено ряд експериментальних досліджень. Отримані дані представлялись у вигляді одиничних відліків *smpl* 16-ти розрядного АЦП, частота

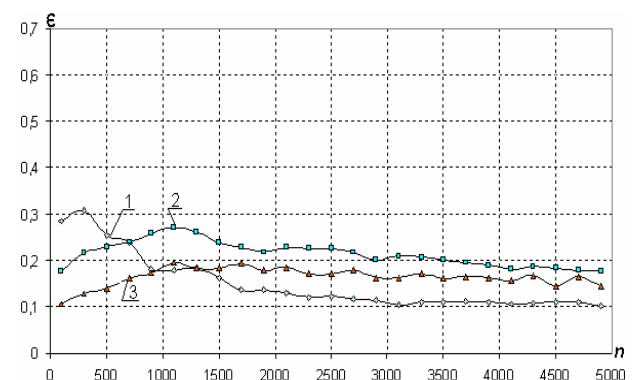
оцифровування значень з діапазону -32768 до +32767 (відліки АЦП *smpl*) амплітуди досліджуваного процесу складала 44100 Гц.

Як відомо, найбільш поширеними серійними АЦП є 8 та 16-розрядні. Тому слід розглянути саме такі пристрої. При цьому отримання статистичних оцінок для АЦП нижчої розрядності може бути реалізовано шляхом застосування відповідних коефіцієнтів перетворення: при перетворенні 16-розрядного представлення у 12-розрядне потрібно $Si(16)/4096$, 16-розрядне у 8-розрядне – $Si(16)/256$. Результати обчислення похибки ϵ на основі критерію Стюдента [7] вимірювання для різних величин витрат газового середовища зумовлені зміною розрядності АЦП подано на рис. 6 та рис. 7.



1 – витрата 3 м³/год.; 2 – витрата 5 м³/год.;
3 – витрата 8 м³/год.

Рисунок 6 – Залежність похибки від розміру вибірки *n* обчислення оцінки для 8 – розрядного АЦП



1 – витрата 3 м³/год.; 2 – витрата 5 м³/год.;
3 – витрата 8 м³/год.

Рисунок 7 – Залежність похибки від розміру вибірки *n* обчислення оцінки для 12 – розрядного АЦП

Як можна побачити з отриманих результатів, похибка для 12-розрядного АЦП є дещо більшою, складає 0,45; а для 8-розрядного – 0,4. Таким чином АЦП меншої розрядності забезпечує кращу точність перетворення вимірювальної інформації при менших затратах на апаратну реалізацію цифрових засобів опрацювання даних.

Слід зазначити, що у випадку застосування статистичного підходу середній квадратичний відхил оцінок ентропії буде мати найменше значення при зростанні розрядності АЦП та із збільшенням розміру вибірки. Це, в свою чергу, дасть змогу зменшити верхню границю похибки вимірювання засобу, реалізованого на основі запропонованого вдосконалення.

ВИСНОВКИ

Фактично цифрова обробка вимірювальних сигналів ґрунтується на первинному перетворенні неелектричних величин, причому точність такого перетворення впливає на невизначеність вимірювання. Використання оцінок ентропії як додаткового чи альтернативного джерела інформації про контрольований параметр реалізує перехід від амплітудних до імовірнісних характеристик вимірювальних сигналів. Такий підхід дозволяє розширити інформаційні міри, за яким здійснюється оцінювання характеристик контрольованих параметрів, що в свою чергу дозволяє спростити апаратну реалізацію цифрових засобів вимірювання а також покращити метрологічні характеристики шляхом усунення додаткової похибки, зумовленої дрейфом нуля амплітуди первинних перетворювачів.

1. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы. – К.: Вища школа, 1986. – 504 с. 2. Хоровиц П. Искусство схемотехники: В 3-х томах: Т. 2. Пер. с англ./ П. Хоровиц, У. Хилл — 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Мир, 1993.—371 с. 3. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества. Справочник. Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989. – 701 с. 4. Пат. МПК 7 G01F25/00 №77083 Спосіб вимірювання витрати на основі статистичних характеристик шуму вимірюваного середовища / Мельничук С. І., Пашикевич О. П. від 16.10.2006 р. 5. Пашикевич О. П. Особенности застосування статистичних характеристик шуму контрольованого середовища при вимірюванні витрати газу / О. П. Пашикевич, С. І. Мельничук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – № 4. – Ч. 1, Т. 1. – С. 200-204. 6. Оппенгейм А. В. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ./ А. В. Оппенгейм, Р. В. Шафер – М.: Связь, 1973. – 416 с., 6. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с. 7. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с. 8. Генерация аэродинамического шума в элементах систем вентиляции. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.astralok.com/view_st.php?id=3.

Поступила в редакцію 08.03.2012 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук,
проф. Середюк О.Є.