

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-47>
УДК 004.382.3

МАНУЛЯК ІРИНА

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
<https://orcid.org/0000-0002-0072-1532>
e-mail: manyulyak-irynd@ukr.net

ЯКОВИН ІГОР

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
<https://orcid.org/0009-0003-5844-8246>
e-mail: igor.com.2009@gmail.com

МАНУЛЯК РОМАН

ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬКСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ»
<https://orcid.org/0000-0002-6749-6632>
e-mail: manulyakroman@gmail.com

ВАТУЛЯК ТИМОФІЙ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
<https://orcid.org/0009-0003-8666-9484>
e-mail: tymofiiivatuliak@gmail.com

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ ЗЧИТУВАННЯ АНАЛОГОВИХ СИГНАЛІВ СЕНСОРІВ ВИТРАТИ ГАЗУ З ОБІНОМ ДАНИМИ ЧЕРЕЗ UART

У роботі розглянуто питання розроблення програмно-апаратних засобів зчитування аналогових сигналів сенсорів вимірювальних каналів газових лічильників із подальшою передачею даних через інтерфейс UART для їх накопичення та обробки у комп'ютерних системах. Запропоновано структуру програмного забезпечення мікроконтролерної системи із використанням мікроконтролера Microchip Technology ATmega328PU для оцифрування аналогових сигналів вимірювальних перетворювачів витрати газу. Розроблено програмний модуль зчитування даних із використанням внутрішнього аналого-цифрового перетворювача та їх передачі через UART у середовище комп'ютерної обробки з подальшим збереженням у форматі CSV. Проведено аналіз інформаційних втрат у вимірювальних каналах із імпульсними датчиками витрати газу та обґрунтовано доцільність використання аналогових сигналів для підвищення точності вимірювань у комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних системах.

Ключові слова: комп'ютерні системи, вимірювальні сигнали, UART, аналого-цифрове перетворення, статистична обробка, мікроконтролер.

MANULIAK IRYNA, YAKOVYN IHOR

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

MANULIAK ROMAN

SE "IVANO-FRANKIVSKSTANDARTMETROLOGY"

VATULIAK TYMOFII

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

DEVELOPMENT OF A HARDWARE–SOFTWARE COMPLEX FOR READING ANALOG SIGNALS FROM GAS FLOW SENSORS WITH DATA TRANSMISSION VIA UART FOR COMPUTER PROCESSING SYSTEMS

The paper addresses the development of software and hardware tools for reading analog signals from sensors in the measuring channels of gas meters, followed by data transmission via the UART interface for accumulation, storage, and further processing in computer-based systems. A functional structure of the microcontroller system software is proposed using the microcontroller developed by Microchip Technology, namely the ATmega328PU, to perform analog-to-digital conversion of signals obtained from gas flow measurement transducers.

A dedicated software module for continuous data acquisition has been developed based on the internal analog-to-digital converter of the microcontroller, which ensures stable sampling of low-frequency analog signals under real operating conditions. The acquired measurement data are transmitted through the UART communication interface to a computer processing environment, where they are accumulated, preprocessed, and stored in CSV format for subsequent statistical analysis and visualization.

Special attention is paid to the analysis of information losses occurring in measuring channels that utilize pulse-type gas flow sensors. The study demonstrates that the use of analog signal acquisition methods significantly reduces quantization and transmission errors compared to traditional pulse-based approaches. This enables improved accuracy and reliability of measurement results in computerized information and measurement systems operating under conditions of signal distortion and external interference.

The proposed approach can be applied in low-speed monitoring systems for gas consumption parameters, contributing to increased precision of measurement data acquisition and enhancing the efficiency of further digital signal processing in embedded computer engineering applications.

Keywords: computer systems, measurement signals, UART, analog-to-digital conversion, statistical processing, microcontroller.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.02.2026
Прийнята до друку / Accepted 11.03.2026
Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Мануляк Ірина, Яковин Ігор, Мануляк Роман, Ватуляк Тимофій

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасні інформаційно-вимірювальні системи обліку енергоресурсів потребують підвищення точності вимірювання витрати газу, особливо у діапазоні малих значень витрат. У більшості традиційних систем первинні вимірювальні перетворювачі формують імпульсні сигнали, що відповідають дискретним об'ємам вимірюваного середовища. Такий підхід характеризується обмеженою інформативністю, оскільки процес формування імпульсів у разі малих витрат може супроводжуватись значними часовими затримками та втратами інформації.

Використання аналогових сигналів, що формуються вимірювальними перетворювачами на основі оптичних або магнітних сенсорів, дозволяє отримати додаткову інформацію про стан вимірювального процесу та підвищити точність визначення витрати газу. Реалізація комп'ютеризованих систем збору даних із використанням мікроконтролерних платформ забезпечує можливість оцифрування аналогових сигналів безпосередньо у вимірювальному каналі з подальшою передачею результатів у цифровому вигляді через послідовні інтерфейси зв'язку.

У цьому контексті актуальною є задача розроблення програмного забезпечення для зчитування аналогових сигналів сенсорів із використанням вбудованих аналого-цифрових перетворювачів мікроконтролерів, передачі даних через інтерфейс UART та подальшої статистичної обробки вимірювальних сигналів у комп'ютерних системах.

Аналіз досліджень та публікацій

Сучасні дослідження у сфері інформаційно-вимірювальних систем свідчать про широке застосування імпульсних давачів витрати газу, зокрема на основі геконів та магнітоіндуктивних сенсорів [1]. Основними чинниками похибки таких систем є нестабільність формування імпульсів, вплив завад та обмежена інформативність при малих витратах газу.

У наукових публікаціях останніх років обґрунтовується доцільність переходу до аналого-цифрових методів зчитування сигналів із використанням мікроконтролерних платформ (зокрема родини STM32), що забезпечують гнучке налаштування частоти дискретизації, цифрову фільтрацію та передачу даних через стандартні інтерфейси. Такий підхід дозволяє зменшити інформаційні втрати, підвищити точність вимірювання та створити умови для подальшого аналізу і корекції даних [2].

Формулювання цілей статті

Метою статті є підвищення інформативності та точності вимірювання витрати газу шляхом розроблення програмно-апаратного комплексу зчитування аналогових сигналів сенсорів із передачею даних через інтерфейс UART для подальшої обробки в комп'ютерних системах.

Для досягнення поставленої мети передбачено розв'язання таких завдань: аналіз особливостей імпульсних та аналогових каналів вимірювання; обґрунтування вибору параметрів дискретизації; реалізація алгоритмів автоматичного налаштування АЦП; експериментальна оцінка точності та стабільності роботи розробленої системи.

Виклад основного матеріалу

Для проведення дослідження характеристик вимірювальних сигналів, що формуються лічильником газу необхідно розробити відповідні програми, зокрема:

- для мікроконтролера, як первинної ланки формування оцифрованих амплітуд, що передаються через UART для збереження та подальшої обробки на комп'ютері;
- для зчитування даних, що передає мікроконтролер через UART і збереженням у файл формату CSV.

Апаратна частина для зчитування та оцифрування аналогових сигналів з перетворювача об'єму та об'ємної витрати газу скомпонована на основі поширеного підключення внутрішнього аналого-цифрового перетворювача плати мікроконтролера Atmega328PU, рисунок 1.

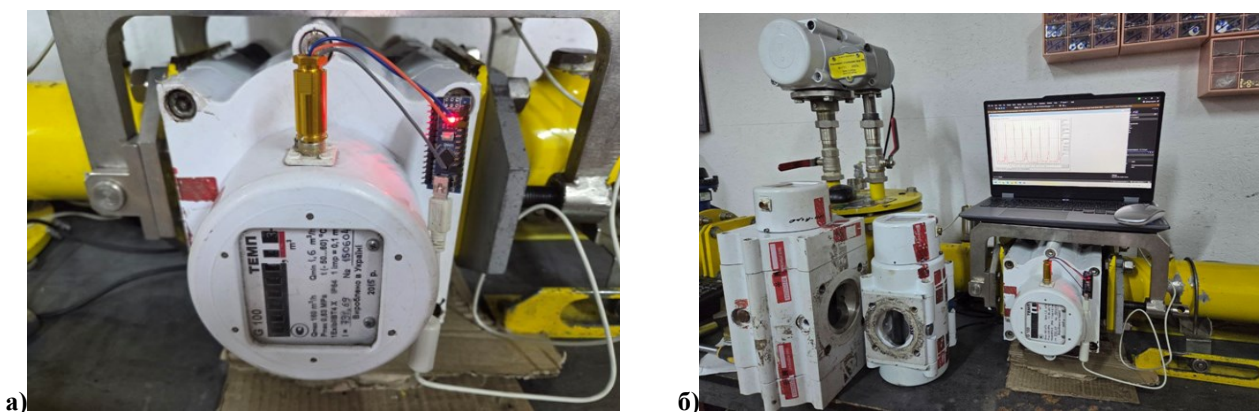


Рис.1. Апаратна частина для зчитування та оцифрування аналогових сигналів: а) схема мікроконтролера; б) стенд дослідження характеристик вимірювальних сигналів

Схему перетворення механічного переміщення мірного елементу лічильника G100, що передбачена конструкцією і забезпечує формування аналогового сигналу на основі оптопари під'єднано до виводу A0 плати мікроконтролера.

Для розробки програми для мікроконтролерної плати, що здійснює зчитування і оцифрування аналогових сигналів з визначеною частотою дискретизації, їх масштабування та подальшу передачу у форматі CSV (Comma-Separated Values) через послідовний інтерфейс (UART) було використано мову C++.

Структура програма для мікроконтролера складається з двох основних частин:

- ініціалізації (setup), яка виконується одноразово при запуску системи, де здійснено налаштування параметрів передачі даних через послідовний порту UART, автоматичний підбір коефіцієнта поділу частоти (prescaler) для внутрішнього АЦП, а також формування заголовку для подальшого формування вихідного CSV-файлу на стороні приймання даних.

- безкінечний цикл (loop), що виконується безперервно та відповідає за періодичне зчитування сигналу, його масштабування та виведення результатів у цифровій та аналоговій формах.

Для забезпечення відповідної частоти формування цифрових сигналів, частота роботи вбудованого аналого-цифрового перетворювача (АЦП) повинна перебувати в діапазоні 50–200 кГц [3]. Оскільки тактова частота мікроконтролера ATmega328P складає 16 МГц, програмою реалізовано автоматичний вибір коефіцієнта поділу частоти (prescaler), що забезпечує найближче значення частоти до цільового (100 кГц):

```
uint32_t F_CPU = 16000000UL;
uint32_t targetAdcClk = 100000;
int prescalers[] = {2, 4, 8, 16, 32, 64, 128};
```

Програма перебирає всі можливі значення prescaler, обчислює фактичну частоту роботи АЦП ($adcClk = F_CPU / prescaler$) і вибирає той коефіцієнт, при якому різниця між отриманою і цільовою частотою є мінімальною. Далі відповідні біти prescaler записуються до регістру ADCSRA:

```
ADCSRA = (ADCSRA & 0b11111000) | prescalerBits;
```

Таке рішення дозволяє програмі автоматично адаптуватися до різних частот процесора або змін параметрів системи без ручного втручання користувача. Фрагмент коду на мові C++, що здійснює автоматичний вибір prescaler для АЦП подано нижче:

```
uint32_t F_CPU = 16000000UL;
uint32_t targetAdcClk = 100000;
int prescalers[] = {2, 4, 8, 16, 32, 64, 128};
int bestPrescaler = 128;
float minDiff = 1e6;
for(int i=0; i<7; i++){
    float adcClk = F_CPU / prescalers[i];
    float diff = abs(adcClk - targetAdcClk);
    if(diff < minDiff){ minDiff = diff; bestPrescaler = prescalers[i]; }
}
```

Крім того, частоту дискретизації нескладно визначити через відповідну змінну:

```
const float desiredSampleRate = 1000.0;
```

На основі цього значення розраховується інтервал між вибірками у мікросекундах:

```
unsigned long sampleInterval = 1000000.0 / desiredSampleRate;
```

Функція micros() використовується для відстеження часу, що минув від попереднього зчитування. Таким чином, зчитування з аналогового входу (analogRead(analogPin)) виконується лише тоді, коли минув заданий інтервал, що забезпечує сталу частоту дискретизації, незалежно від швидкодії інших частин програми.

Після кожного зчитування з аналогового входу програма виводить набір даних згідно попередньо описаного заголовку у такому форматі:

- необробленого 10-бітного значення АЦП (Raw);
- цифрових значень, змінених відповідно до розрядності від 10 до 1 біта;
- відповідних аналогових напруг для кожної з розрядностей у вольтах.

Приклад структури одного рядка:

```
Raw, 10bit, 9bit, ..., 1bit, 10bit (V), 9bit (V), ..., 1bit (V)
```

Такий формат дає можливість аналізувати, як зміна розрядності впливає на точність вимірювання та величину квантування.

І ході виконання основного циклу програми, виконується перерахунок розрядності та вихідного значення напруги для кожної такої розрядності АЦП за відповідною формулою:

$$V = \frac{ADC_{scaled}}{2^n - 1} \cdot V_{ref}$$

де n – кількість бітів,

V_{ref} – опорна напруга (5 В),

ADC_{scaled} – значення АЦП для конкретної розрядності.

Фрагмент коду на мові C++, що здійснює перетворення розрядності АЦП в діапазоні від 10 до 1 подано нижче:

```
for (int bits = 10; bits >= 1; bits--) {
    int shift = 10 - bits;
    int scaledValue = rawAdc >> shift;
```

```
Serial.print(scaledValue);
Serial.print(","); }
```

Фрагмент коду на мові C++, що здійснює перерахунок вихідної напруги для відповідної розрядності АЦП подано нижче:

```
for (int bits = 10; bits >= 1; bits--) {
    int shift = 10 - bits;
    int scaledValue = rawAdc >> shift;
    int maxValue = (1 << bits) - 1;
    float voltage = (scaledValue * vRef) / maxValue;
    Serial.print(voltage, 3);
    if (bits > 1) Serial.print(","); }
```

Вивід отриманих результатів здійснюється через об'єкт Serial, що представляє клас взаємодії з послідовним комунікаційним портом UART. В ході тестування апаратно-програмної системи встановлено, що, стабільна робота системи досягається при частотах дискретизації до 15 кГц, що є прийнятним для вирішуваної задачі моніторингу аналогових сигналів у системах низької швидкодії, зокрема вимірювальних сигналів лічильника об'єму та об'ємної витрати газу.

Таким чином, розроблена програма забезпечує достатньо стабільне зчитування аналогових даних з можливістю задавання частоти дискретизації, автоматичним підбором параметрів АЦП та зручним форматом CSV виведення результатів через порт UART. Розроблена апаратно-програмна система використовуватися як базовий модуль для систем збору даних, де потрібна синхронізація процесу оцифровування аналогових сигналів з подальшим збереженням результатів для подальшого дослідження.

У традиційних інформаційно-вимірювальних системах для моніторингу витрат газу часто застосовуються імпульсні перетворювачі, які надають дані про дискретні об'єми газу у одиничних величинах, зокрема геркони, магнітно-індуктивні, оптичні датчики та датчики Холла. Ці пристрої зазвичай забезпечують інформацію про переміщення мірних елементів.

Однак із розвитком новітніх технологій, що дозволяють обробляти дані безпосередньо на вимірювальній ділянці та передавати їх у цифровому форматі, значно підвищується інформативність, а також надійність первинних перетворювачів [4].

Сучасні моделі первинних перетворювачів із рухомими мірними елементами також в основному надають вимірювальні дані в одиничному форматі, що зумовлено особливостями конструкції та способами вимірювання. В переважній згадані фіксують дискретні об'єми вимірюваного середовища відповідними імпульсними сигналами, однак цей метод для малих витрат газу має низьку інформаційну ефективність, оскільки утворення імпульсів займає значний час, що підвищує ймовірність помилок у їх кількості.

У таких системах, що працюють з лічильниками газу з імпульсним вихідним сигналом, майже неможливо відновити втрачену інформацію чи коригувати дані в разі тимчасових перерв в роботі або технічних відмов [5]. Для оцінки можливих інформаційних втрат під час роботи перерахованих перетворювачів було проведено низку експериментів з промисловими приладами внутрішнього обліку для вимірювання об'єму та витрат газу, зокрема типів PL, PL, ЛГ, при вимірюваннях у контрольних точках діапазону [26]. Визначено розбіжність в кількості імпульсів (дискретних об'ємів) в межах однієї витрати на основі багатократних спостережень, результати яких наведені у таблицях 1-3.

$$\Delta_i = f(N_{max i} - N_{min i})$$

де: Δ_i – величини розбіжності кількості імпульсів між еталонним та дослідним датчиками від витрати газу;

$N_{max i}, N_{min i}$ – максимальна, мінімальна кількість імпульсів в i -тій точці діапазону.

Таблиця 1

Середнє значення відхилення кількості імпульсів від об'єму витрати газу для промислових вимірювальних приладів барабанного типу PL

				(кількість імпульсів)
0,018	5,300	0,036	3,630	2,628
0,030	5,800	0,040	3,973	4,380
0,045	5,500	0,038	3,767	6,570
0,055	5,000	0,034	3,425	8,030
0,070	5,000	0,034	3,425	10,22
0,090	6,000	0,041	4,110	13,14
0,110	5,700	0,039	3,904	16,06
0,130	5,600	0,038	3,836	18,98
0,170	5,700	0,039	3,904	24,82
0,250	6,000	0,041	4,110	36,50
0,350	5,800	0,040	3,973	51,10
0,450	5,500	0,038	3,767	65,70
0,550	6,000	0,041	4,110	80,30

Таблиця 2

Середнє значення відхилення кількості імпульсів від об'єму витрати газу для промислових вимірювальних приладів роторного типу РЛ

				σ (кількість імпульсів)
1	1,8	0,00450	0,450	400
1,2	1,8	0,00450	0,450	480
1,6	2,0	0,00500	0,500	640
2	1,9	0,00475	0,475	800
2,5	1,8	0,00450	0,450	1000
3	11,0	0,02750	2,750	1200
4	4,0	0,01000	1,000	1600
4,2	2,0	0,00500	0,500	1680
6	6,9	0,01725	1,725	2400
7	1,9	0,00475	0,475	2800
8	11,9	0,02975	2,975	3200
10	4,0	0,01000	1,000	4000
11,3	7,8	0,01950	1,950	4520

А також здійснено обчислення абсолютної похибки для промислових вимірювальних приладів згаданих типів на основі середнього значення відхилення кількості імпульсів від об'єму витрати газу. Результати представлені на рисунках 2-4.

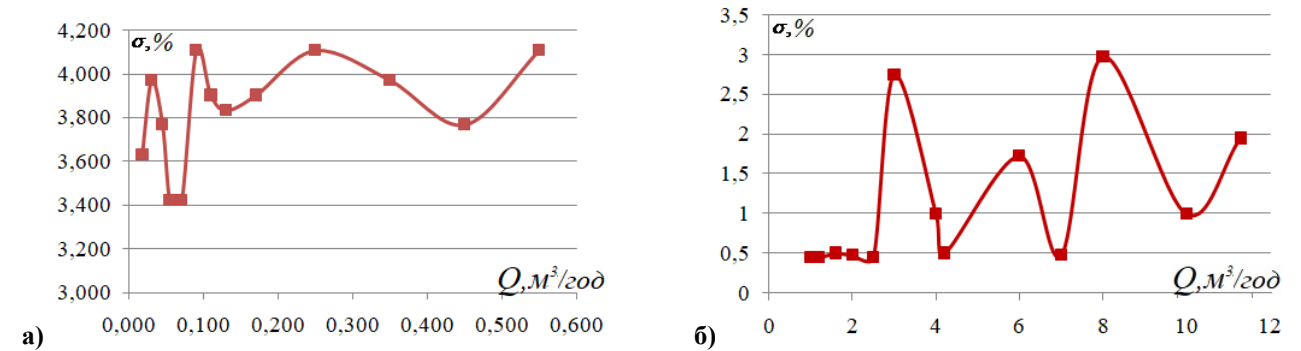


Рис. 2. Похибка для промислових вимірювальних приладів на основі середнього значення відхилення кількості імпульсів від об'єму витрати газу: а) барабанного типу РЛ; б) роторного типу РЛ

Таблиця 3

Середнє значення відхилення кількості імпульсів від об'єму витрати газу для промислових вимірювальних приладів турбінного типу ЛГ

				σ (кількість імпульсів)
14	9,9	0,00099	0,099	140000
17,1	4,9	0,00049	0,049	171000
22,3	2,7	0,00027	0,027	223000
38,4	8,7	0,00087	0,087	384000
72,3	6,8	0,00068	0,068	723000
123,4	6,8	0,00068	0,068	1234000
178,9	5,0	0,00050	0,050	1789000
224,7	7,2	0,00072	0,072	2247000
260,1	12,1	0,00121	0,121	2601000
590,5	26	0,00260	0,260	5905000
995,3	29,8	0,00298	0,298	9953000
1320,2	29,9	0,00299	0,299	13202000
1732,1	25	0,00250	0,250	17321000

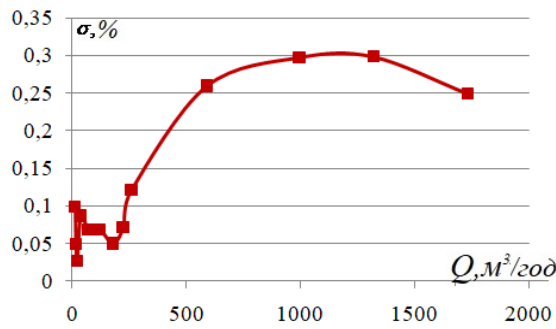


Рис. 3. Похибка для промислових вимірювальних приладів турбінного типу ЛГ на основі середнього значення відхилення кількості імпульсів від об'єму витрати газу

Проведено дослідження діапазону частот для різних типів лічильників. Результати максимальних та мінімальних значень представлено у таблиці 4.

Таблиця 4

Максимальне та мінімальне значення діапазонів частот для різних промислових вимірювальних приладів

Промисловий вимірювальний прилад	Максимальне значення частоти, Гц	Мінімальне значення частоти, Гц
Барабанный тип PL	0,022306	0,000730
Роторний тип PL	278,6301	24,65753
Турбінний тип ЛГ	70,24628	0,567778

Похибки вимірювань можуть виникати з різних причин, зокрема через неточності у виготовленні чутливих елементів (скануючих дисків, зубчатих коліс), нерівномірність газового потоку, а також через зміни сил тертя в механічних вузлах і впливи на самі перетворювачі з боку зовнішніх факторів, що призводять до спотворення сигналів. Використання таких приладів у промислових умовах також ускладнюється наявністю завад, спричинених комутаціями [6]. У системах, що працюють з лічильниками газу, що мають імпульсні вихідні сигнали в унітарному коді, відсутня можливість поновлення втрачених даних та автоматичного коригування помилкових сигналів при тимчасових порушеннях роботи системи, перешкодах або відмовах.

Інформаційно-вимірювальні канали, що використовуються для вимірювання витрат газу, засновані на обробці сигналів первинних перетворювачів, що взаємодіють з потоком контролюваного середовища. Однак існуючі промислові реалізації таких систем здебільшого обмежені локальним відображенням вимірювальної інформації, що не дозволяє ефективно передавати дані на відстані понад декілька метрів. Використання методів цифрової обробки і недорогих цифрових технологій може допомогти зменшити інформаційні втрати, викликані перешкодами, і покращити точність вимірювань первинних перетворювачів з механічними мірними елементами. Проте навіть ці технології мають обмеження в роботі на великих відстанях, оскільки вони розраховані на локальні вимірювання [7].

Враховуючи ці труднощі, одним із перспективних напрямків є використання оптичних первинних перетворювачів, зокрема міткового типу, які мають компактні розміри, цифрову обробку сигналів і можуть використовувати готові частотні фільтри. Використання унітарного базису для перетворення переміщення мірних елементів призводить до певних недоліків, пов'язаних із виділенням інформативних складових сигналу, що потребує складних рішень при реалізації схем опрацювання таких сигналів.

Одним із потенційних рішень може стати застосування ймовірнісного підходу в обробці імпульсних сигналів, зокрема методів обробки на основі логіко-статистичних інформаційних моделей (ЛСІМ), які дозволяють зменшити помилки в сигналах, є важливою складовою частиною розвитку інформаційно-вимірювальних систем. З розвитком цифрових компонентів і мікроконтролерів, що мають вбудовані аналого-цифрові перетворювачі, а також розроблених у попередньому розділі програм, стає можливим аналіз форми сигналу та його статистичних характеристик, що дозволяє використати ЛСІМ та удосконалити процес обробки вимірювальних даних і зменшити ймовірність виникнення помилок в результатах вимірювань.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі розроблено програмний модуль зчитування аналогових сигналів вимірювальних сенсорів із використанням вбудованого аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера ATmega328PU та їх передачі через інтерфейс UART для подальшої обробки у комп'ютерних системах. Запропоновано структуру програмного забезпечення, що забезпечує накопичення даних у форматі CSV для проведення подальшого аналізу. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем моніторингу витрати газу з підвищеними метрологічними характеристиками.

Література

1. Manuliak, I. Z., Melnychuk, S. I., Striletskyi, Yu. Yo., & Harasymiv, V. M. Gas flow measuring system using signal processing on the basis of entropy estimations. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021, no. 5, pp. 125–130. ISSN 2071-2227 (print), ISSN 2223-2362 (online).
2. Мануляк, І. З., Стрілецький, Ю. Й., Топалов, А. М., Грига, В. М. Аспекти використання змагальних збурень при навчанні штучних нейронних мереж на основі перцептронів згорткового типу. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, 2025, № 2(84), с. 111–116. DOI: <https://doi.org/10.30748/zhups.2025.84.13>
3. Білинський, Й. Й., Каплун, В. В. Інформаційно-вимірювальні системи та їх програмна реалізація. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2021, № 5, с. 102–108.
4. Кухарчук, В. В., Долинюк, О. В. Методи та засоби цифрової обробки вимірювальних сигналів. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, 2022, № 3(55), с. 58–64.
5. Лисенко, О. В., Кравчук, О. П. Мікроконтролерні системи збору та обробки даних. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 2023, № 2, с. 74–80.
6. Мельник, А. О. *Архітектура комп'ютерних систем реального часу : навч. посіб.* Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. 336 с.
7. Зайченко, Ю. П. *Інтелектуальні інформаційно-вимірювальні системи : навч. посіб.* Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 284 с.
8. Єременко, В. С., Щербань, А. П. *Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи* [Електронний ресурс]. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/items/773a91b1-241f-475d-b16a-e46114e1010e> (дата звернення: 16.02.2026).
- 9.

References

1. Manuliak I.Z. Gas flow measuring system using signal processing on the basis of entropy estimations. / I.Z. Manuliak, S.I. Melnychuk, Yu.Yo. Striletskyi, V.M. Harasymiv // *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – №5 (2021). – s.125-130. ISSN (print) 2071-2227, ISSN (online) 2223-2362.
2. Manuliak I.Z. Aspekty vykorystannia zmahalnykh zburen pry navchanni shtuchnykh neironnykh merezh na osnovi pertseptroniv zghortkovoho typu. / I.Z. Manuliak, Yu.I. Striletskyi, A.M. Topalov, V.M. Hryha // *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl*. 2025. № 2(84). С. 111-116. <https://doi.org/10.30748/zhups.2025.84.13>
3. Bilynskiy Y. Y., Kaplun V. V. Informatsiino-vymiriivalni systemy ta yikh prohramna realizatsiia./ Y.I. Bilynskiy, V.V. Kaplun // *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2021. № 5. S. 102–108.
4. Kukharchuk V. V. Metody ta zasoby tsyfrovoi obrobky vymiriivalnykh syhnaliv. / V.V. Kukharchuk., O.V. Dolyniuk // *Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia*. 2022. № 3 (55). S. 58–64.
5. Lysenko O. V. Mikrokontrolerni systemy zboru ta obrobky danykh. / O.V. Lysenko, O.P. Kravchuk // *Radioelektronni i kompiuterni systemy*. 2023. № 2. S. 74–80.
6. Melnyk A.O. Arkhitektura kompiuternykh system realnoho chasu : navch. posib. / A.O. Melnyk // *Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki*, 2021. 336 s.
7. Zaichenko Yu.P. Intelektualni informatsiino-vymiriivalni systemy : navch. posib. / Yu.P. Zaichenko // *Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho*, 2022. 284 s.
8. Ieremenko V.S. Kompiuteryzovani informatsiino-vymiriivalni systemy [Elektronnyi resurs] / V.S. Yeremenko, A.P. Shcherban // *Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho*, 2024. – Rezhym dostupu: <https://ela.kpi.ua/items/773a91b1-241f-475d-b16a-e46114e1010e>. – (Data zvernennia 16.02.2026) – *Kompiuteryzovani informatsiino-vymiriivalni systemy*.