

## МЕРЕЖЕВИЙ ІНТЕГРУЮЧИЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

*Сформульовано вимоги до завадостійкості універсальних АЦП сигналів сенсорів фізичних величин. Розроблено структуру гнучкого завадостійкого АЦП двохтактного вагового інтегрування, призначеного для адаптивних та інтелектуальних дистрибутивних систем збору і обробки сенсорних даних. Отримані шляхом імітаційного моделювання залежності коефіцієнтів подавлення завад нормального виду порівняно з результатами їх експериментального дослідження.*

### Умовні позначення

АЦП	- аналого-цифровий перетворювач;
$E_A, E_B, E_C; R^1, R^2, R^3$	- напруги трифазного живлення електропечі та опори її нагрівачів;
$R^1, R^2$	- опір ізоляції між сенсорами і нагрівачем (для $1000^\circ\text{C} \sim 10\text{ кОм}$ );
$R^{LC1}_1, R^{LC1}_2, R^{LC2}_1, R^{LC2}_2$	- опір лінії зв'язку ( $\sim 10\text{ Ом}$ );
$R^{MXO1}_1, R^{MXO1}_2, R^{MXS1}_1, R^{MXS1}_2$	- опір відкритого і закритого ключів комутатора ( $\sim 50\text{ Ом}$ і $10^8\text{ Ом}$ );
$R^{EC}_1, R^{EC}_2$	- опір вхідного кола на корпус;
$U^{CN}_1, U^{CN}_2$	- напруги завад загального виду сенсор - корпус ( $0 \dots 220 \cdot \sqrt{2} = 310\text{ В}$ );
$U^{IC}$	- напруга завад загального виду між каналами ( $0 \dots 380 \cdot \sqrt{2} = 540\text{ В}$ );
$B$	- вектор індукції магнітного поля;
$U^{NN}_1, U^{NN}_2$	- напруга завад нормального виду ( $0 \dots 20\text{ мВ}$ ).

Основні параметри систем збору і обробки сенсорних даних значною мірою визначаються АЦП. Більшість сенсорів фізичних величин мають на виході сигнал низького рівня, в основному, у вигляді напруги постійного струму, яку спотворюють завади різного виду. Аналіз сигналів розповсюджених сенсорів показав, що універсальний АЦП систем збору даних повинен забезпечувати перетворення в код напруги в діапазонах  $10 \dots 1000\text{ мВ}$  з похибкою  $0,02 \dots 0,1\%$ . Такою похибкою можна нехтувати для більшості сенсорів, але її необхідно забезпечити при дії промислових завад нормального і загального виду значного рівня. Використання нормуючих перетворювачів на вході АЦП дає можливість роботи з сигналами високого рівня  $0 \dots 10\text{ В}$ ,  $0 \dots 10\text{ мА}$  або  $4 \dots 20\text{ мА}$  [1] і покращує умови подавлення завад, але збільшує похибку і ціну каналів збору даних. Тому в системах збору даних широко використовують АЦП низького рівня. Їх типовим представником є модуль I-7018 фірми ICScom [2], що допускає підключення всіх широко вживаних типів термопар. Його основні параметри:

кількість каналів	– 8 диференціальних;
піддіпазони перетворення напруги	– 15 мВ, 50 мВ, 100 мВ, 500 мВ, 1 В, 2,5 В;
границя основної допустимої похибки	– 0.1%;
швидкодія	– 10 перетворень/сек;
коефіцієнт подавлення завад нормального виду	– 100 дБ, загального виду – 150 дБ (при допустимій напрузі гальванічної розв'язки 3000 В).

Розглянемо вплив завад на АЦП на прикладі широко розповсюдженої підсистеми збору даних від термопар в системах керування температурою в електропечах опору (рис.1) [1]. Більшість електропечей живляться трифазною напругою, причому нагрівачі включаються зіркою. Опір ізоляторів при високій температурі різко падає. Як показали експериментальні дослідження, при температурах вище  $1000^\circ\text{C}$  опір ізоляції сенсорів  $R^1, R^2$  не перевищує  $10\text{ кОм}$ . Тоді, як видно з рис.1, сенсори  $S1 \dots Sn$  є підключеними до джерела (еквівалентного генератора), дійсна е.р.с. якого, щодо землі, визначається просторовим розподілом опору ізоляції і положенням термопар щодо нагрівачів  $R^1, R^2, R^3$ , а максимальна може досягати амплітудного значення напруги нагрівачів  $E_A, E_B, E_C$ , рівного  $220 \cdot \sqrt{2} \approx 310\text{ В}$ . Це і є максимальна

напруга завади загального виду. Внутрішній опір джерела завади відповідає  $R^1_1, R^1_2$ . Використання заземлених металевих чохлаів для екранування термопар істотно збільшує її ціну і часто не допускається технологічним обладнанням. Коефіцієнт подавлення завади загального виду визначається відношенням опору лінії зв'язку  $R^{LC1}_1 \dots R^{LC2}_2$  до опору ізоляції вхідного кола АЦП на корпус  $R^{EC}_1, R^{EC}_2$  та завадостійкістю самого АЦП. Для багатоканальних АЦП важливою є також напруга між окремими каналами. Як видно з рис.1, її максимальне значення визначається амплітудою лінійної напруги трифазної мережі живлення, тобто рівне  $380 \cdot \sqrt{2} \approx 540$  В. Розраховані рівні завад не повинні викликати ні пробую елементів АЦП, ні різкого збільшення похибки перетворення.

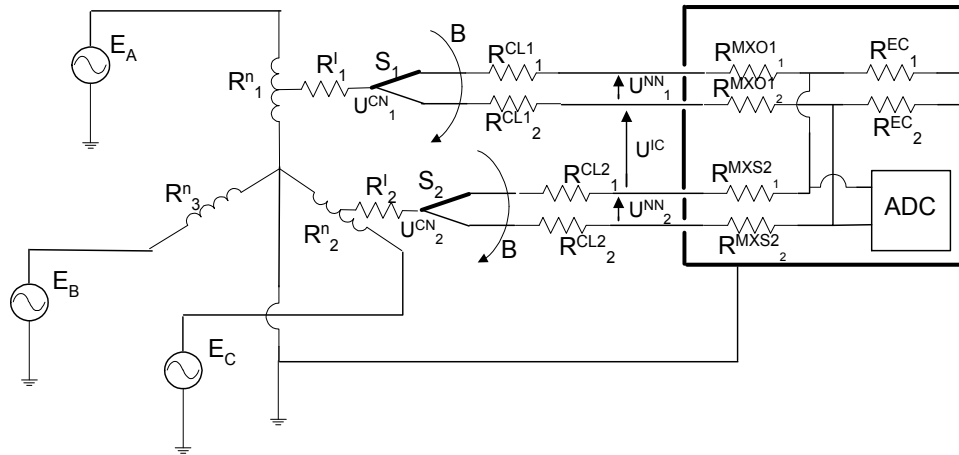


Рис. 1. Вплив завад на температурні сенсори.

Крім розглянутих завад загального виду, на АЦП впливають завади нормального виду. Вони зумовлені впливом вектора магнітної індукції  $B$  на замкнутий електричний контур, утворений сенсором. Як показали експериментальні дослідження, напруга завад нормального виду звичайно не перевищує 10...20 мВ, але вона співмірна з сигналом термопар. Крім того, струм завади загального виду, протікаючи через провідники  $R^{LC1}_1, R^{LC1}_2, R^{LC2}_1, R^{LC2}_2$ , створює на них спад напруги, а це приводить до перетворення завади загального виду в залишкову заваду нормального виду.

Структурна схема АЦП I-7018, подана на рис.2, включає комутатор MUX, сигма-дельта АЦП ADC типу AD7712 з вбудованим підсилювачем AMP, мікро-ЕОМ MC 89C52, адаптер інтерфейсу IFA і джерела живлення PS1 і PS2. Подавлення завад нормального виду забезпечується завадостійкістю АЦП, а загального виду – оптронною розв'язкою OP і симетруючими резисторами R1 і R2. Судячи з параметрів, АЦП I-7018 може мати широке застосування. Однак експериментальні дослідження показують, що:

- допустима напруга між каналами не перевищує 10 В (визначається мікросхемами комутатора ADG437 і їх напругою живлення);
- допустима напруга завади загального виду також не перевищує 10 В (визначається співвідношенням еквівалентного опору гальванічної розв'язки до опору симетруючих резисторів, а також допустимою синфазною напругою АЦП).

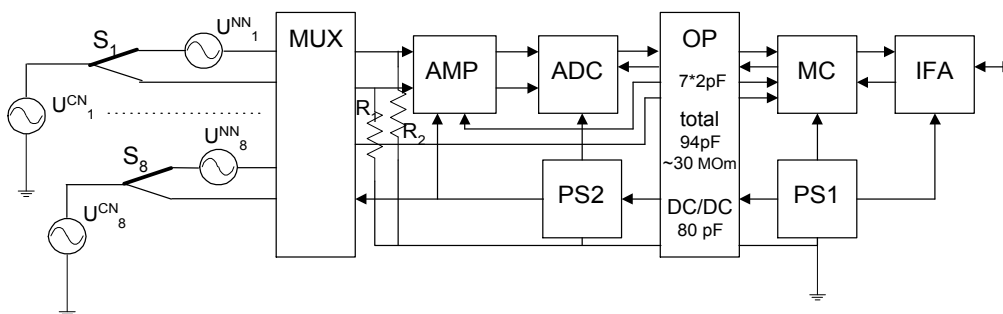


Рис. 2. Структурна схема АЦП типу I-7018.

Зроблені висновки підтверджені відповідними експериментальними дослідженнями. Ці ж дослідження показали, що при закороченні одного з симетруючих резисторів R1 або R2 завадостійкість АЦП, при дії завад амплітудою більше 10 В значно зростає. Щодо декларованої допустимої напруги гальванічної розв'язки 3000 В, то в даному АЦП гарантується відсутність пробою при цій нарузі, а не працездатність АЦП з нормованими похибкою та параметрами завадостійкості. Метою даної статті є розробка АЦП, який забезпечує високу точність і завадостійкість при дії завад різного виду високої інтенсивності за рахунок адаптації до умов експлуатації.

### Структура розробленого АЦП

Для використання в умовах дії завад розроблено 8-ми каналний 16-ти розрядний АЦП. Як базу вибрано метод двотактного вагового інтегрування [3], який забезпечує подавлення завад великої амплітуди [4]. Структура розробленого АЦП (рис.3) подібна до структури I-7018, але микро-ЕОМ МС перенесена в аналогову частину АЦП, а оптронами розв'язані сигнали послідовного інтерфейсу, що зменшило їх кількість з 7 до 2, і, відповідно, знизило ємність розв'язки. Комутатор MUX виконано на герконових реле РГК 15, що забезпечило необхідну допустиму напругу між каналами, а додаткові термовирівнювачі знизили паразитні термо-е.р.с. комутатора до 1 мкВ [5]. Підсилювач

АМР реалізовано на включеному по неінвертуючій схемі операційному підсилювачі OP177, його вхідний опір досягає 50 МОм. ADC подвійного вагового інтегрування реалізує вагову функцію 1-2-1. В АЦП передбачено можливість автоматичних установки нуля і калібрування по нарузі Eref (як Eref використано мікросхему AD780 з подільником на манганінових резисторах). Високочастотний перетворювач постійної напруги DC/DC реалізований на окремих елементах (на відміну від I-7018, де використано мікромодуль). Це збільшило його розміри, але зменшило ємність гальванічної розв'язки з 80пФ до 20пФ. Отже, опір вхідного кола на корпус R<sup>EC</sup>, для завади частотою 50 Гц не менший 100 МОм. Тому, з врахуванням подавлення залишкової завади загального виду як завади нормального виду, оцінка коефіцієнту подавлення завад загального виду розробленим АЦП для R<sup>LC1</sup> = 1 кОм [1] складає 180 дБ. Однак рівень шумів ±0,5 мкВ дозволяє нормувати його тільки на рівні 170 дБ.

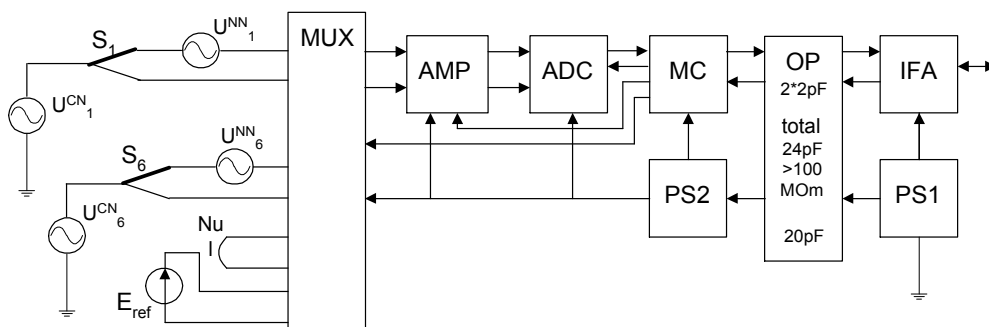


Рис. 3. Структурна схема розробленого АЦП

### Дослідження коефіцієнта подавлення завад нормального виду

Для визначення параметрів завадостійкості АЦП була розроблена його імітаційна модель і досліджено вплив на нього завад нормального виду. Модель завади має вигляд:

$$U_{IN} = U_M \times \sin(2 \times \pi \times f \times t + \varphi) \quad (1)$$

де:  $U_{IN}$  і  $U_M$  - поточне й амплітудне значення напруги завади, В;  $f$  - поточна частота завади, Гц;  $\varphi$  - поточна фаза завади, рад.

При реалізації вагової функції 1-2-1 результат перетворення напруги завади (1) може бути поданий як сума визначених інтегралів

$$U_{ON} = \int_0^{10ms} U_{IN} dt + 2 \times \int_{10ms}^{20ms} U_{IN} dt + \int_{20ms}^{30ms} U_{IN} dt, \quad (2)$$

яка відповідає результату однократного аналого-цифрового перетворення без врахування постійної складової вхідної напруги, тобто відбиває власне дію завад. Коефіцієнт подавлення завад визначається згідно з [1] за формулою

$$K = 20 \times \lg(U_M / U_{ON}) \quad (3)$$

і залежить як від  $f$ , так і від  $\varphi$ . Для підвищення завадостійкості в [3] пропонується використання дискретного усереднення результатів  $n$  послідовних перетворень, між якими вводять затримку  $\tau$  з метою зміни на протилежні умов дії завад в окремих перетвореннях. Для такого випадку залежність (2) перетворюється в наступну суму

$$U_{ONA} = \sum_{i=0}^{n-1} \left( \int_{i \times \tau}^{i \times \tau + 10ms} U_{IN} dt + 2 \times \int_{i \times \tau + 10ms}^{i \times \tau + 20ms} U_{IN} dt + \int_{i \times \tau + 20ms}^{i \times \tau + 30ms} U_{IN} dt \right), \quad (4)$$

причому  $\tau = (2 \times k + 1) / (2 \times f)$ .

Коефіцієнт подавлення завад в такому випадку визначається аналогічно до (3) з врахуванням дії процедури усереднення згідно з (4).

Результати досліджень моделі при зміні  $f$  в межах 49...51 Гц і зміні  $\varphi$  в межах 0...2 $\pi$  рад подані на рис.4 і рис.5. На горизонтальних осях відкладені частота і фаза завади нормального виду, а на вертикальній – коефіцієнт її подавлення. На рис. 4 представлено результат моделювання при однократному перетворенні. Мінімальний коефіцієнт подавлення завад узгоджується з результатами експериментальних досліджень [6], отже, використану модель можна вважати коректною.

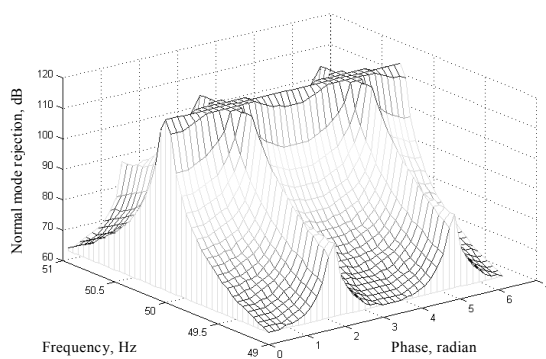


Рис. 4. Залежність значення коефіцієнта подавлення завад нормального виду для однократного перетворення

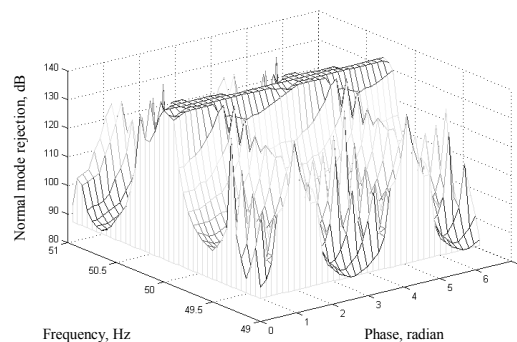


Рис. 5. Залежність значення коефіцієнта подавлення завад нормального виду для режиму усереднення з цензуруванням

Дослідження різних режимів показало, що усереднення і цензурування (відкидання крайніх результатів з варіаційного ряду результатів перетворень, які усереднюють) суттєво покращують завадостійкість АЦП. На рис. 5 зображено залежності коефіцієнта подавлення завад нормального виду при усередненні 12 результатів перетворення з цензуруванням при затримці між перетвореннями 95 мс. Мінімальний коефіцієнт подавлення складає 88 дБ. Однак моделювання також показало (рис. 6), що цензурування, при відсутності імпульсних завад, зменшує коефіцієнт подавлення завад нормального виду. Це видно з рис. 7 і 8, де подані залежності

коефіцієнтів подавлення для обох режимів при часі затримки 95 мс. Рис. 7 і 8 є січеннями графіка рис. 6 по осях кількості усереднень та часу між запусками.

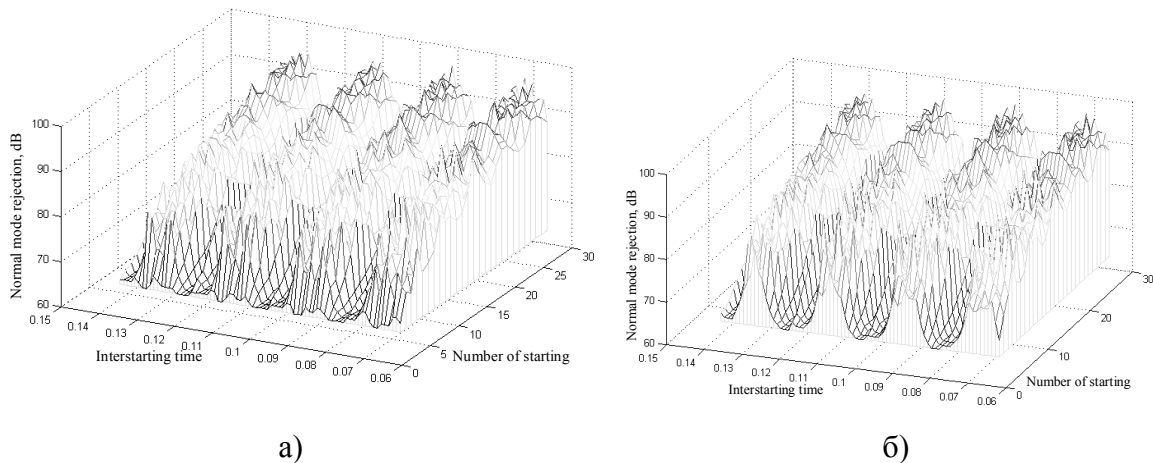


Рис. 6. Коефіцієнт подавлення завад нормального виду від кількості усереднень та часу між запусками в режимі а – усереднення, б – усереднення і цензурування

На рис. 9 зображені результати експериментальних досліджень коефіцієнта подавлення завад від кількості результатів перетворень для виключно усереднення і усереднення з цензуруванням в умовах електропечі типу СУОЛ. Ці результати досить добре узгоджуються з результатами моделювання (рис. 6, 7, 8), хоча цензурування, на відміну від даних рис. 7, забезпечує краще подавлення завад. Це можна пояснити значним рівнем імпульсних завад в електропечі з тиристорним регулятором.

В розробленому АЦП передбачено можливість дистанційного задання тривалості першого такту інтегрування. Якщо завади формуються мережею живлення, це дозволяє суттєво підвищити завадостійкість АЦП в системах, в яких ведеться моніторинг мережі живлення (наприклад, блоки безперебійного живлення Smart UPS передають поточну частоту мережі живлення комп'ютеру). За результатами моделювання, якщо частота мережі задається з точністю  $\pm 0,1$  Гц, то навіть при однократному перетворенні коефіцієнт подавлення завад нормального виду перевищує 100 дБ (рис. 10). Однак навіть тоді доцільним залишається використання режиму усереднення з цензуруванням для зменшення впливу на результат перетворення як зовнішніх імпульсних завад, так і внутрішніх шумів самого АЦП.

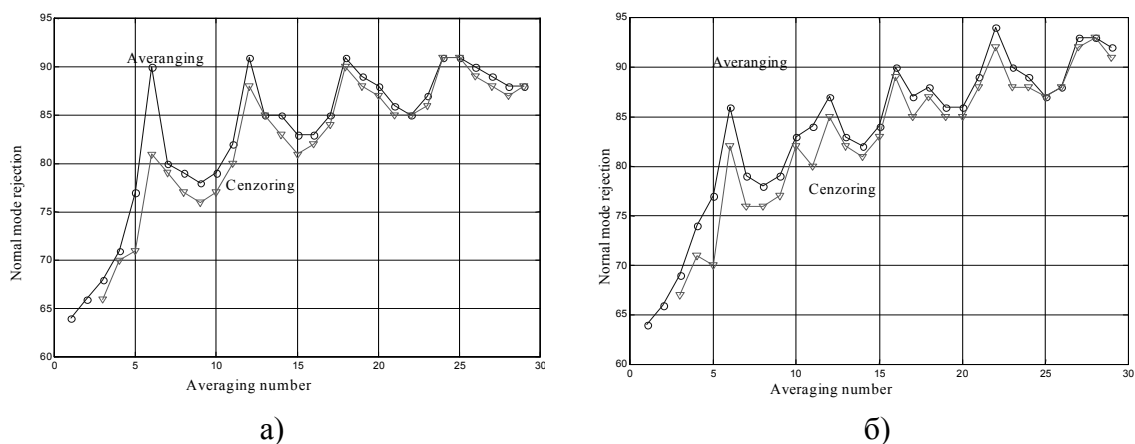
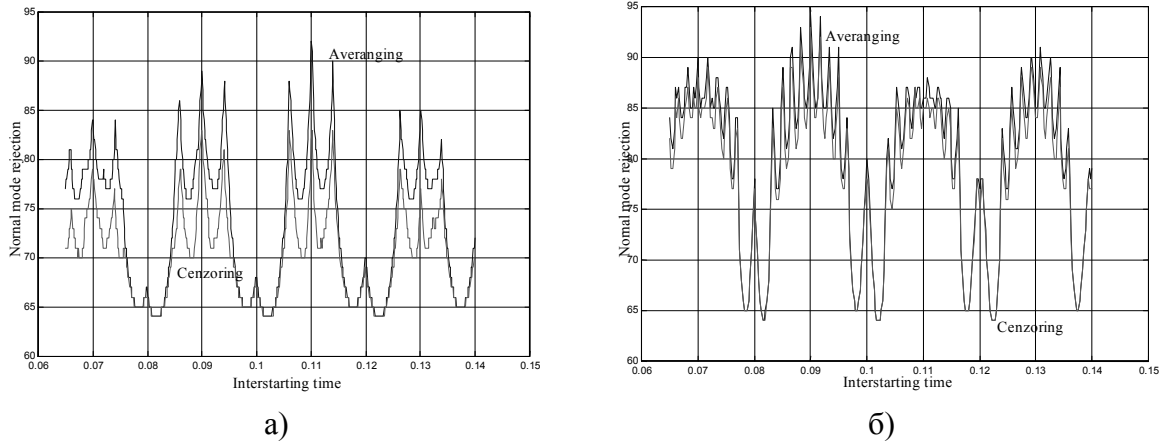


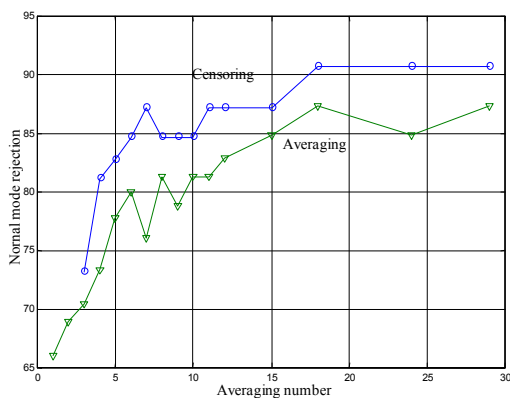
Рис. 7. Коефіцієнт подавлення завад нормального виду від кількості усереднень для режимів усереднення і цензурування (час між усередненнями а – 95 мс, б – 75 мс)

Розроблений АЦП в основному призначений для використання в розподілених адаптивних прецизійних системах збору сенсорних даних. Основною особливістю розробленого АЦП є гнучкість та можливість адаптуватися до умов експлуатації. Він

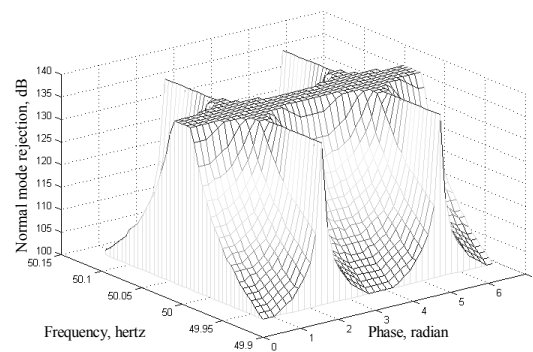
забезпечує встановлення через інтерфейс режимів автоматичного визначення діапазону перетворення, цензурування й усереднення, а також частоти завади, часу затримки при усередненні. Передбачена адаптація періоду корекцій адитивної і мультиплікативної похибок до швидкості їх наростання (задається допустимий дрейф), однак забезпечення кращих параметрів за точністю та завадостійкістю приводить до збільшення середнього часу перетворення АЦП.



**Рис. 8.** Коефіцієнт подавлення завад нормального виду для режимів усереднення і цензурування від часу між запусками (кількість усереднень а – 5, б – 22)



**Рис. 9.** Результати експериментальних досліджень коефіцієнта подавлення завад нормального виду



**Рис. 10.** Коефіцієнт подавлення завад нормального виду при корекції тривалості першого такту інтегрування

### Параметри розробленого АЦП

Кількість каналів перетворення – 8 (з них - 2 службових);  
розрядність вихідного коду – 16;

Діапазони перетворення	Чутливість	Границя основної допустимої похибки перетворення, %	
		Без установки нуля і калібрування	З установкою нуля і калібруванням
±1000 мВ	40мкВ	1/0,1	0,02/0,01
±200 мВ	8 мкВ	1/0,1	0,02/0,01
±50 мВ	2 мкВ	1/0,1	0,03/0,02
±10 мВ	0.5 мкВ	1/0,1	0,03/0,02

максимальна швидкодія - 12 перетворень на секунду;  
коефіцієнти подавлення завад нормального виду:

- ◆ без корекції тривалості першого такту інтегрування - 64...86 дБ (в залежності від кількості усереднень і режиму цензурування);
- ◆ з корекцією тривалості першого такту інтегрування - більше 100 дБ.

коефіцієнт подавлення завад загального виду - 170 дБ;  
 допустима напруга між каналами 600 В;  
 допустима напруга гальванічної розв'язки 1500 В;  
 підтримувані послідовні інтерфейси - RS232 (3-х чи 2-х провідний [7]);  
 сенсори, які можуть бути безпосередньо підключені до АЦП:

- ◆ термопари: S(ПП), В, R(ПР), К(ХА), L, J(ХК), Т, N, Е;
- ◆ термометри опору: Pt10(10П), Pt50(50П), Pt100(100П), Pt500, Pt1000, Ni10, Ni50, Ni100, Cu10(10М), Cu50(50М), Cu100(100М);
- ◆ термістори: опір - 10 Ом...1М Ом при 20°С.

Слід зауважити, що дійсне значення похибки аналого-цифрового перетворення в конкретних умовах сильно залежить від дистанційно заданих параметрів і адаптації.

### **Висновки**

Дослідження розробленого АЦП показали, що він може використовуватися в прецизійних та інтелектуальних системах збору і обробки сенсорних даних в умовах впливу завад нормального і загального виду високого рівня. Його параметри і дистанційне задання режимів роботи забезпечують високу гнучкість його використання в прецизійних системах низької вартості. Слід зауважити, що його метрологічні характеристики в складі таких систем погано описуються методами традиційної метрології. Це пов'язано з тим, що ці характеристики визначаються факторами, які можуть під час роботи дистанційно змінюватися (допустимий дрейф адитивної та мультиплікативної похибки, завадостійкість) або визначаються в процесі адаптації (швидкодія). Тому надалі необхідно розробити математичні моделі його метрологічних характеристик і визначити їх в процесі експлуатації, як це запропоновано для інтелектуальних систем [8, 9].

АЦП розроблений відповідно до проекту “Investigation of the Intelligent Properties of Re-Configurable Network Capable Application Processor in Adaptive Distributed Instrumentation and Control Systems” (грант UE2-2534-TE-03, фінансований фондом CRDF USA).

*There are formalized requirements to noise stabile universal ADCs for signals of sensors of physical quantities. There is described structure of developed of noise stabile dual slope weight integration ADC for adaptive and intelligent distributed data acquisition systems. The common mode rejection coefficients are obtained by numeric simulation and compared simulation results with experimental researches. The set of ADC operation modes and its adaptive properties provide high flexibility of its application into mentioned systems.*

### **Література**

1. Кончаловский В.Ю. Цифровые измерительные средства. Учебное пособие для студентов ВУЗов. Москва: Энергоатомиздат, 1985.
2. [www.icpdas.com/download/7000/manual/7018.pdf](http://www.icpdas.com/download/7000/manual/7018.pdf).
3. А.С. №842606: Цифровой интегрирующий вольтметр. Бахмутский В.Ф., Кочан В.В., Матвиив В.И., Ржевский А.Ф. Бюлетень № 24, 1981.
4. Кочан В.В., Матвиив В.И., Козицкий Й.Д., Саченко А.О. Цифровой измеритель температуры Ф4835. Метрология и прецизионные измерения. Научно-технический сборник. 1979, № 11.
5. А.С. №711380 Реле на герконе. Мильченко В.Ю., Кочан В.В., Рылик М.Г., Саченко А.О. Бюлетень № 26, 1980.
6. Матвиив В.И. Методы и средства повышения помехоустойчивости время-импульсных преобразователей. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Пенза, 1984.
7. В. Кочан, В. Тимчишин. Двопровідна локальна обчислювальна мережа. Патент України №25609А, 1997.
8. В.Соболев. Метрологическое автосопровождение результатов измерений в интеллектуальных измерительных системах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: Санкт-Петербург, 1999.

9. R.Kochan. Approach to development metrological software test for verification intelligent instrumentation. Proc. of second IEEE international workshop on Intelligent Data Acquisition and Advansing Computing Systems (IDAACS'2003), September 9 - 11, 2003, Lviv, Ukraine, pp. 168 – 173.

*Одержано 16.03.2004 р.*