

УДК 658.5:681.3

Азаров О. Д., д-р.техн.наук,
Крупельницький Л. В., канд. техн. наук,
Снігур А. В.,
Гарнага В. А.,
Решетнік О. О.

КОРИГУВАННЯ СТАТИЧНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ІВС, ЯКИЙ МІСТИТЬ АЦП ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

Вінницький національний технічний університет

Розглянуті методи коригування статичних похибок вимірювального каналу системи опрацювання стрибкоподібних сигналів. Також розглянуті методи коригування похибок комутатора. Показано, що коригувати похибки нуля, масштабу та комутатора у складі каналу можливо шляхом послідовного включення його вузлів у коло калібрування АЦП із ваговою надлишковістю. На основі розглянутих методів розроблені системи для сейсмозвідки та акустичних вимірювань.

Вступ

Процес функціонування інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) характеризується впливом різних зовнішніх факторів, зокрема температури, вологості тощо, що призводить до погіршення статичних характеристик їх вузлів. Внаслідок цього виникає необхідність коригувати похибки вимірювального каналу (ВК) системи, зокрема за допомогою самокаліброваного аналого-цифрового перетворювача (АЦП) на основі вагової надлишковості – надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ), що може входити до структури каналу. У даній роботі розглядаються багатоканальні вимірювальні системи (які опрацьовують стрибкоподібні сигнали), що використовуються у сейсмозвідці при пошуку корисних копалин, при оцінюванні акустичної якості приміщення, а також ті, які отримують параметри з точок акупунктури людини (за якими в подальшому здійснюється визначення стану її здоров'я).

У ВК сучасних перерахованих ІВС [1-3] недостатньо враховується вплив факторів зовнішнього середовища, статичних похибок каналів на кінцевий результат вимірювання параметрів досліджуваних сигналів. Така ситуація може призвести до помилок, наприклад, при пошуку корисних копалин або визначення стану здоров'я людини. На основі описаного вище можна зазначити, що проблема під-

вищення точності ВК існуючих ІВС у перерахованих вище галузях, зокрема шляхом коригування його статичних характеристик за допомогою АЦП, що самокалібрується, на сьогоднішній день є актуальною.

Метою статті є аналіз шляхів підвищення точності існуючих ІВС у галузях сейсмозвідки, акустичних вимірювань та дослідження стану здоров'я людини шляхом коригування статичних похибок ВК за допомогою АЦП на основі НПСЧ, що самокалібрується.

Задачами досліджень є:

1. Аналіз можливостей коригування похибок ВК, зокрема, нуля та масштабу.
2. Розгляд запропонованих методів коригування похибок масштабу та нуля ВК, зокрема, за допомогою АЦП, що самокалібрується і входить до складу каналу.
3. Аналіз похибок комутатора у складі ВК, методу їх коригування та отримання рівнянь перетворення ВК.

Коригування похибок нуля та масштабу ВК

Розглянемо структуру ВК ІВС та його похибки, що можливо коригувати.

У загальному випадку ВК ІВС складається з таких вузлів: давач (Д), підсилювач (П), комутатор каналів (КК), пристрій вибірки та зберігання (ПВЗ), АЦП, спеціалізований цифровий обчислюваль-

ний пристрій (СЦОП). Перераховані вузли, за винятком СЦОП, вносять свій вклад у загальну похибку нуля каналу, а також масштаб. Додатково до цього, для здійснення коригування похибок, до структури ВК (рис.1) можуть входити: АЦП із с/к – АЦП із самокалібруванням, калібрувальний ЦАП, Кл – ключ, БК – блок керування, Т – блок вимірювання температури (додатково вводиться до складу системи, він подає сигнал на здійснення самокалібрування при змінній температурі навколишнього середовища). На рис.1 $R_{дi}$ – опір давача, $R_{мi}$ – масштабний резистор, $R_{цап}$ – опір ЦАП, $N_{вих}$ – вихідний код, y_1, y_2 – сигнали керування.

Коригування похибки нуля та масштабу

ВК необхідно здійснювати тільки після самокалібрування АЦП, що входить до структури каналу. Під самокалібруванням АЦП і ІВС на їх основі розуміється окрема автоматична процедура визначення відхилень від номінальних значень параметрів окремих пристроїв або ВК системи (в цілому) і формування протягом вказаної процедури коригувальних поправок з метою зменшення статичних похибок із перериванням при цьому процесу основного перетворення (вимірювання) [4-6]. У результаті самокалібрування АЦП врівноважує вхідний сигнал (напругу) у вигляді

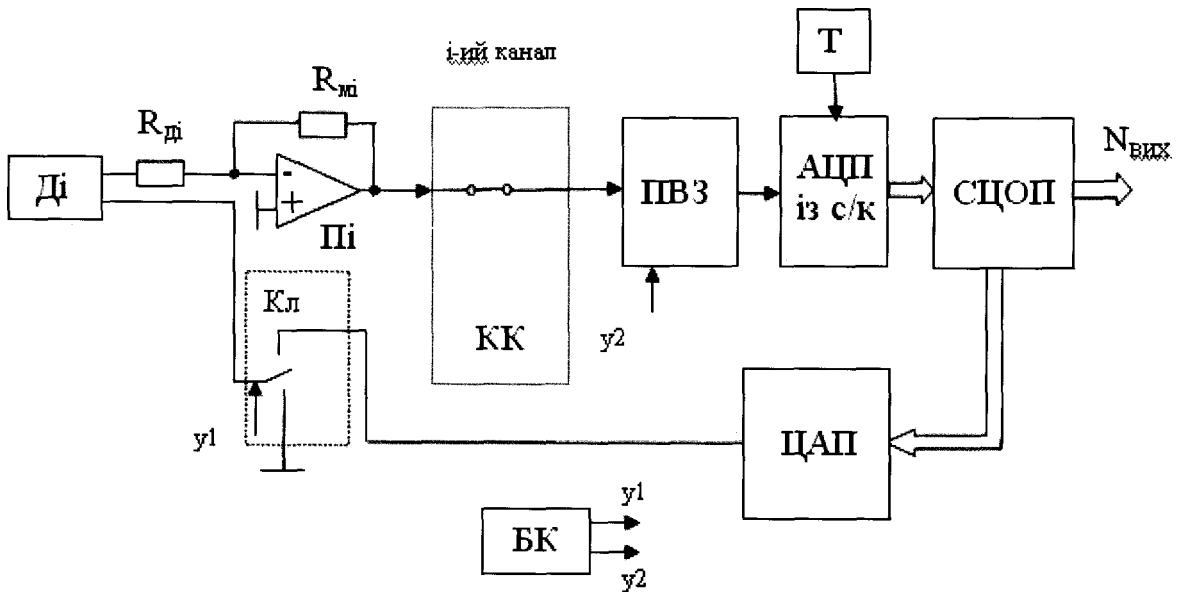


Рис. 1. Структурна схема i -го вимірювального каналу ІВС у режимі самокалібрування

$$U_{ex.} = \sum_{j=0}^{n-1} a_j Q_j^* - U_{зм},$$

де a_j – розрядні коефіцієнти коду (0 або 1), Q_j^* – реальна вага розряду у ВК, $U_{зм}$ – напруга зміщення нуля.

Після даної процедури коригування похибки зміщення нуля ВК можна здійснювати при підключенні входів давачів до "0" та врівноваження відповідного при цьому вхідного сигналу в АЦП. Розглянемо як при цьому функціонує ВК (рис.2).

Згідно наведеного алгоритму відбувається почергове підключення за

допомогою ключів нульового потенціалу $U_{вх}=0$ до кожного з давачів Ді. При цьому на виході АЦП формується відповідна кодова комбінація $N_{зм}$. На основі $N_{зм}$ обчислюється напруга зміщення за формулою

$$U_{зм_j} = \sum_{i=-d}^{n-1} a_i Q_i^*,$$

де a_i – розрядні коефіцієнти $N_{зм}$, n – кількість розрядів перетворювача, Q_i^* – значення реальних ваг розрядів перетворювача, на основі даної напруги для j -го ВК отримується відповідний код зміщення нуля K_{nj} .

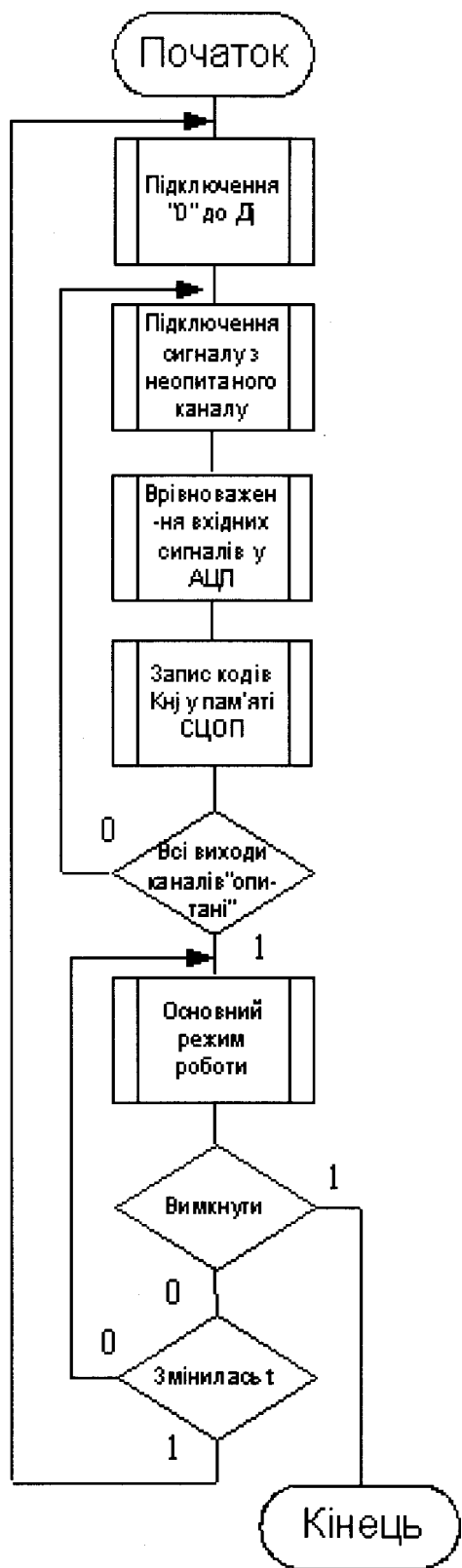


Рис. 2. Алгоритм калібрування похибки нуля

Після цього коди зсуву нуля K_{nj} для кожного з каналів заносяться у пам'ять СЦОП. Дані значення потім враховуються при вимірюванні параметрів досліджуван-них сигналів у основному режимі роботи ІВС (безпосередньо вимірювання). Калібрування можливо здійснювати після

змінення температури t навколишнього середовища, враховуючи таким чином вплив температури на елементи ВК.

Розглянемо особливості методу кори-гування похибки масштабу. Алгоритм калі-брування ІВС (рис. 1) наведено на рис. 3.

При цьому з виходу СЦОП на вхід ЦАП подається заданий код K_0 для калі-брування першого каналу. На основі K_0 ЦАП формує вихідну напругу $U_{кор} \approx U_d$, де U_d – максимальна напруга вхідного діапазона. Дана напруга подається на Д1; далі АЦП врівноважує напругу, отриму-ється код K_1 , який відрізняється від K_0 , він заноситься у пам'ять СЦОП. Потім (для другого каналу) на Д2 з ЦАП пода-ється напруга, що відповідає коду K_0 , врівноважуючи цю напругу за допомогою АЦП, отримується код K_2 . Далі на входи інших Д $_j$ подається напруга, що відпові-дає K_0 , в результаті отримуються коди $K_j - K_1 \dots K_n$. Після змінення температури навколишнього середовища, наприклад на 10^0C , на АЦП подається сигнал для здійс-нення нової процедури калібрування. На основі отриманих кодів для кожного з кан-алів у СЦОП отримуються масштабні множники за формулою

$$M_j = \frac{K_j - K_{nj}}{K_0}$$

При цьому вважається, що інші M_j , будуть розраховуватися відносно M_1 першого каналу. З урахуванням цього

$$M_2 = M_1 + \Delta M_2,$$

$$M_3 = M_1 + \Delta M_3,$$

а

$$M_j = M_1(1 + \Delta M_j / M_1).$$

На основі розрахованих вище значень у пам'яті СЦОП формується таблиця ваг розрядів АЦП з урахуванням масшта-бних коефіцієнтів M_j , наприклад для пер-шого каналу

$$K_1(M_1) * K_1(Q_1),$$

де $K_1(M_1)$ – код M_1 , $K_1(Q_1)$ – код ваги Q_1 . Отримані результати в подальшому вико-ристовуються в основному режимі роботи системи.

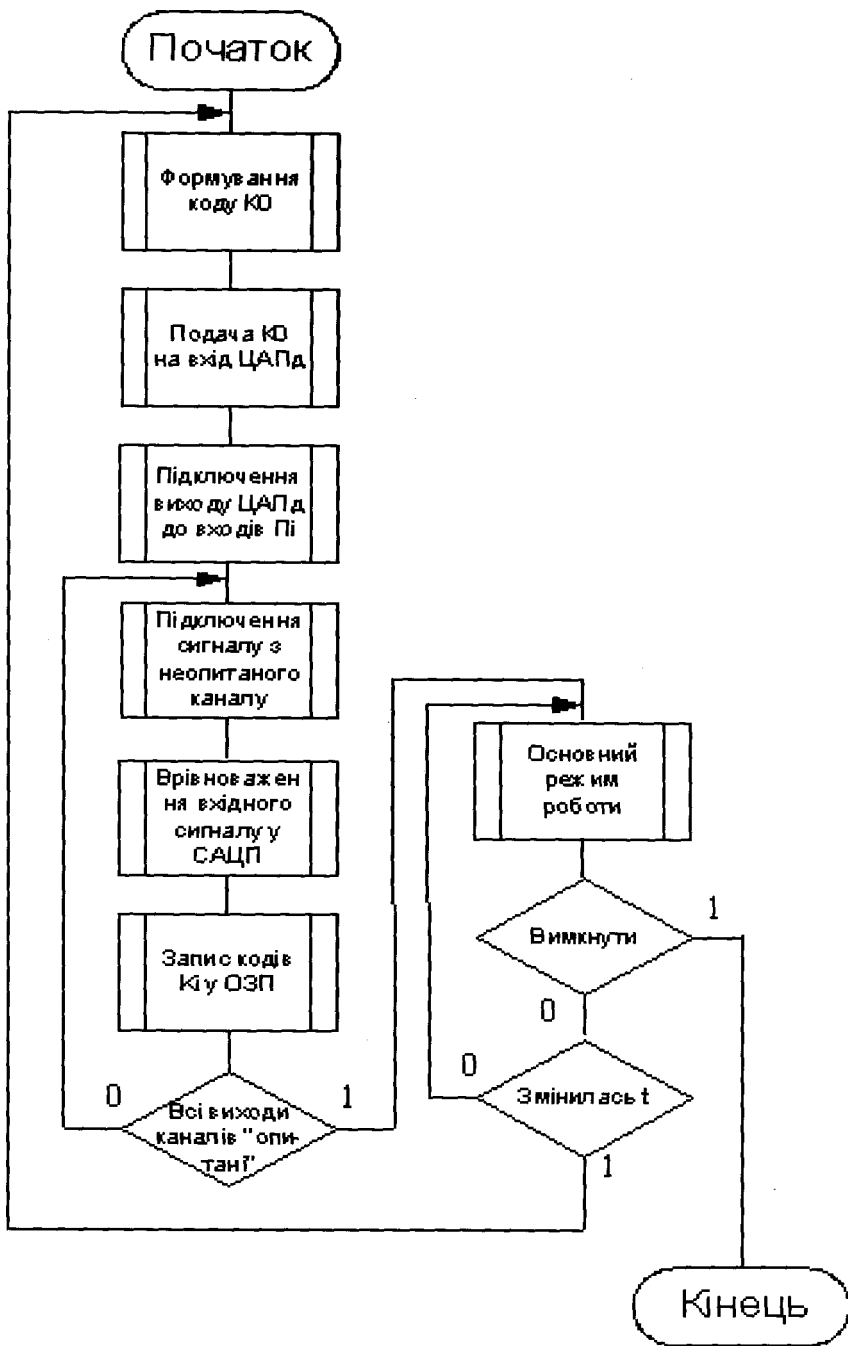


Рис. 3. Алгоритм коригування похибки масштабу

Коригування похибок комутатора

Опишемо метод коригування похибок КК, а потім, базуючись на отриманих рівняннях виведемо загальні рівняння перетворення ВК та розглянемо метод підвищення точності ІВС.

Комутатор у складі ВК характеризується похибкою прямого проходження сигналів через закриті ключі. Вихідну напругу комутатора, після встановлення пе-

рехідних процесів комутації, можна в загальному випадку зобразити у вигляді

$$U_{вих.ком.}(t) = \sum_{i=1}^N m_i U_{вх.i}(t), \quad (1)$$

де $U_{вх.i}(t)$ – вхідна напруга на i -му вхідному каналі, N – число входів комутатора; m_i – комутаційний коефіцієнт, який відображає властивість КК блокувати передачу сигналів по невикористаних входах

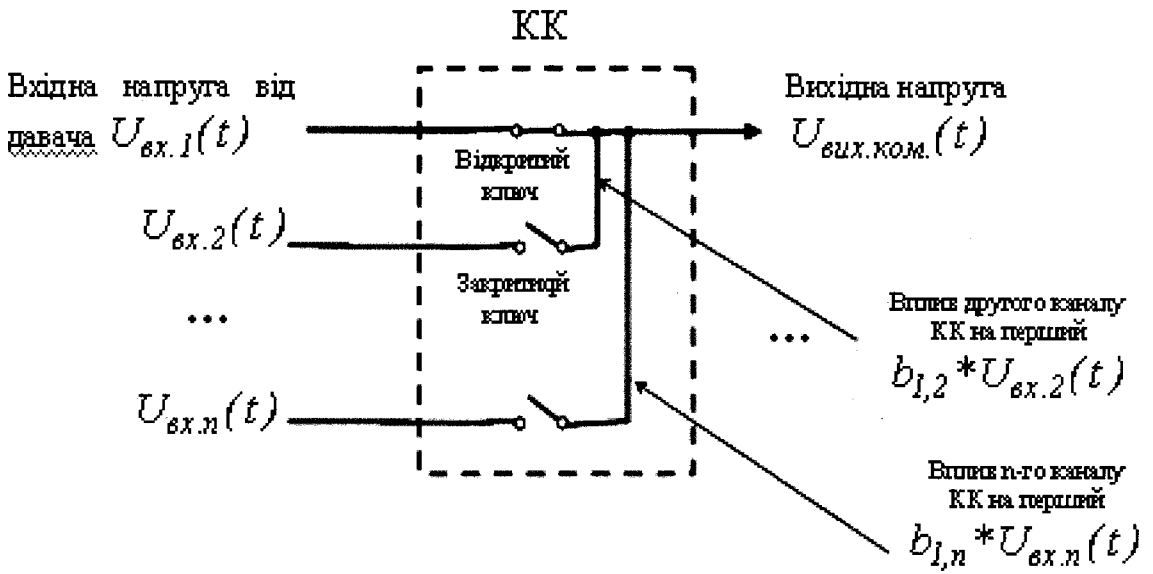


Рис. 4. Комутатор у режимі підключення до виходу першого входу

$$m_i = K_i + b_i(1 - K_i), \quad (2)$$

де $K_i = \overline{0,1}$ – елемент вектора керування К: якщо $K_i = 1$, то i -й ключ замкнений (інші розімкнені), якщо $K_i = 0$, то навпа-

ки, b_i – похибка (безрозмірний коефіцієнт передачі) від неповного замикання i -го ключа (рис. 4), причиною виникнення якої є пряме проходження сигналу через закриті ключі:

$$\begin{cases} U_{вих.ком.1} = U_{вх.ком.1} + b_{1,2}U_{вх.ком.2} + b_{1,3}U_{вх.ком.3} + \dots + b_{1,n}U_{вх.ком.n}, \\ U_{вих.ком.2} = b_{2,1}U_{вх.ком.1} + U_{вх.ком.2} + b_{2,3}U_{вх.ком.3} + \dots + b_{2,n}U_{вх.ком.n}, \\ U_{вих.ком.3} = b_{3,1}U_{вх.ком.1} + b_{3,2}U_{вх.ком.2} + U_{вх.ком.3} + \dots + b_{3,n}U_{вх.ком.n}, \\ \vdots \\ U_{вих.ком.n} = b_{n,1}U_{вх.ком.1} + b_{n,2}U_{вх.ком.2} + b_{n,3}U_{вх.ком.3} + \dots + U_{вх.ком.n}. \end{cases}$$

Тут $b_{1,2}$, $b_{1,n}$ – похибки прямого проходження сигналу відповідно через другий та n -ий ключі.

З описаного вище витікає можливість розгляду метода підвищення точності КК шляхом врахування похибок b_i від наскрізного проходження сигналу. Отже, метод, що пропонується, передбачає подачу одразу на всі входи КК однакової напруги $U_{вх.ком.}$, наприклад від додаткового ЦАП (рис.1). Спочатку розімкненим є перший ключ КК (інші замкнені), потім – розімкненим є другий ключ і т. д. до n -го входу; при цьому на основі (1) отримується система рівнянь, що описує вихі-

дну напругу $U_{вих.ком.i}$ (де i – номер входу).

Оскільки схемотехніка багатовходового комутатора є однорідною [5, 7, 8], то з високим ступенем вірогідності можна вважати, що $b_{1i} = b_{2i} = b_{3i} = \dots = b_{ni} = b_i$. Тоді, з урахуванням того, що

$$U_{вх.ком.1} = U_{вих.ком.2} = U_{вх.ком.3} = \dots = U_{вх.ком.n} = U_{вх.ком.}$$

згідно методу, що розглядається, отримаємо (3):

$$\begin{cases} U_{вих.ком.1} = U_{вх.ком.} + b_2U_{вх.ком.} + b_3U_{вх.ком.} + \dots + b_nU_{вх.ком.}, \\ U_{вих.ком.2} = b_1U_{вх.ком.} + U_{вх.ком.} + b_3U_{вх.ком.} + \dots + b_nU_{вх.ком.}, \\ U_{вих.ком.3} = b_1U_{вх.ком.} + b_2U_{вх.ком.} + U_{вх.ком.} + \dots + b_nU_{вх.ком.}, \\ \vdots \\ U_{вих.ком.4} = b_1U_{вх.ком.} + b_2U_{вх.ком.} + b_3U_{вх.ком.} + \dots + U_{вх.ком.} \end{cases} \quad (3)$$

Похибки від наскрізного проходження сигналу через i -й ключ можуть бути обчислені для всіх входів шляхом розв'язання системи (3) з n рівнянь та n невідомих. При цьому значення $U_{вих.ком.i}$ є відомим і отримуються в АЦП, що кодує вихідну напругу КК.

У загальному випадку b_i можуть визначатися для різних значень напруг (а для спрощення – усереднюватися для випадків подачі максимальної та мінімальної напруг діапазону із відповідними мінімальними та максимальними частото-

$$\begin{cases} U_{вих.ком.1} = U_{вих.ком.1} / (1 + b_2 + b_3 + \dots + b_n), \\ U_{вих.ком.2} = U_{вих.ком.2} / (b_1 + 1 + b_3 + \dots + b_n), \\ U_{вих.ком.3} = U_{вих.ком.3} / (b_1 + b_2 + 1 + \dots + b_n), \\ \vdots \\ U_{вих.ком.n} = U_{вих.ком.n} / (b_1 + b_2 + b_3 + \dots + 1). \end{cases} \quad (4)$$

Базуючися на (4) можливо враховувати похибки КК у СЦОП каналу.

Рівняння перетворення

На основі наведених вище рівнянь розглянемо додатково метод підвищення точності ВК ІВС порівняно з окремими випадками коригування похибок нуля та масштабу. На теперішній час існують різні методи підвищення точності ІВС. Основним їх недоліком, є застосування окремих процедур корекції елементів ВК [5]. В даній роботі пропонується метод підвищення точності ВК системи, що узагальнює виконані окремі процедури корекції та враховує температурне зміння параметрів аналогових елементів каналу.

Введемо в ІВС блок вимірювання температури для визначення температури навколишнього середовища та відповідно визначення часу здійснення калібрування каналу, а також додатковий ЦАП (рис. 1). Метод передбачає коригування похибок елементів ВК шляхом їх послідовного включення у коло калібрування АЦП. При цьому спочатку здійснюється самокалібрування для АЦП згідно [4]. Після

тами вхідного сигналу): при подачі на входи постійної напруги, $U_{вих.ком.} = 0$, інших значень напруг із частотами, що лежить у межах вхідного діапазону, а також напруги $U_{вх} = U_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ із максимальною амплітудою U_{max} та частотою ω діапазону.

На основі (3), результат комутації вхідних сигналів $U_{вих.ком.i}$ (де i – номер входу) для кожного з входів записується у вигляді

даної процедури, АЦП на основі НПСЧ врівноважує вхідний сигнал $U_{вих.ком.i}$ (напругу) у вигляді

$$U_{вих.ком.i} = \sum_{j=0}^{n-1} a_j Q_j^* - U_{зв}, \quad (5)$$

де a_j – розрядні коефіцієнти коду (0 або 1), Q_j^* – реальна вага розряду у [В], $U_{зв}$ – напруга зміщення нуля. Дана напруга є фактично вихідною напругою комутатора КК.

Потім у коло коригування підключається КК. При цьому СЦОП обчислює кінцевий результат вимірювання для кожного з входів комутатора, з урахуванням (4) та (5) у вигляді (6).

Якщо не враховувати похибку фільтру, який у загальному випадку входить до складу ВК, то напруги на виході підсилювачів $U_{вих.нід.1}(U_{вх.}) \dots U_{вих.нід.n}(U_{вх.})$ є відповідно вхідними напругами комутатора згідно (6). При цьому, якщо вираз

$$\left\{ \begin{aligned} U_{ex.kom.1} &= (\sum_{j=0}^{n-1} a_j Q_j^* - U_{zv}) / (1 + b_2 + b_3 + \dots + b_n), \\ U_{ex.kom.2} &= (\sum_{j=0}^{n-1} a_j Q_j^* - U_{zv}) / (b_1 + 1 + b_3 + \dots + b_n), \\ U_{ex.kom.3} &= (\sum_{j=0}^{n-1} a_j Q_j^* - U_{zv}) / (b_1 + b_2 + 1 + \dots + b_n), \\ &\dots \\ U_{ex.kom.n} &= (\sum_{j=0}^{n-1} a_j Q_j^* - U_{zv}) / (b_1 + b_2 + b_3 + \dots + 1). \end{aligned} \right. \quad (6)$$

для вихідних напруг підсилювача записати як

$$U_{вих.nid.}(U_{ex.}) = \Delta_i + K_i \cdot U_{ex.nid.}, \quad (7)$$

де Δ_i – зсув нульового рівня на i -й лінійній ділянці характеристики, визначений при окремій процедурі калібруванні підсилювача [5], K_i – коефіцієнт передачі – крутизна на i -й ліній-

ній ділянці характеристики, розрахована при калібруванні, який враховує описану вище похибку масштабу, $U_{ex.nid.}$ – вхідна напруга підсилювача, та підставити його замість $U_{ex.kom.i}$ у (6), а потім виразити з цього $U_{ex.nid.}$, то отримуємо відповідно напругу на вході підсилювачів, яка є вихідною напругою давачів (8):

$$\left\{ \begin{aligned} U_{ex.nid.1} &= \left[(\sum_{j=0}^{n-1} a_j Q_j^* - U_{zv}) / (1 + b_2 + b_3 + \dots + b_n) - \Delta'_i \right] / K_i, \\ U_{ex.nid.2} &= \left[(\sum_{j=0}^{n-1} a_j Q_j^* - U_{zv}) / (b_1 + 1 + b_3 + \dots + b_n) - \Delta'_i \right] / K_i, \\ U_{ex.nid.3} &= \left[(\sum_{j=0}^{n-1} a_j Q_j^* - U_{zv}) / (b_1 + b_2 + 1 + \dots + b_n) - \Delta'_i \right] / K_i, \\ &\vdots \\ U_{ex.nid.n} &= \left[(\sum_{j=0}^{n-1} a_j Q_j^* - U_{zv}) / (b_1 + b_2 + b_3 + \dots + 1) - \Delta'_i \right] / K_i. \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Значення Δ_i , K_i можна отримати за відомим методом [5] при подачі на входи підсилювачів тестових вхідних напруг та вимірюванні напруг з виходів. Систему рівнянь (8) можливо розрахувати у СЦОП.

Вхідна напруга підсилювача є фактично вихідною напругою давача. Коригування передатної характеристики давача можливо здійснювати подібно до характеристики підсилювача. Калібрування у ВК може періодично повторюватись при зміні температури навколишнього середовища, наприклад на 10^0C . При цьому

блок Т подає сигнал на АЦП для здійснення процедури самокалібрування та коригування характеристики ВК.

Коригування характеристики ВК системи при змінній температури навколишнього середовища дозволяє зменшити похибку при отриманні кінцевого результату вимірювання та підвищити його достовірність, що впливає на зменшення кількості випадків отримання помилок при пошуку корисних копалин, оцінювання акустичної якості приміщення (акустичних вимірюваннях) та визначення стану здоров'я людини.

На основі запропонованих методів у науково-технічному центрі “Аналого-цифрові системи” Вінницького національного технічного університету за

участю авторів розроблені системи для сейсмозв'язки та для акустичних вимірювань (рис. 4, рис. 5).



Рис. 4. Система для акустичних вимірювань

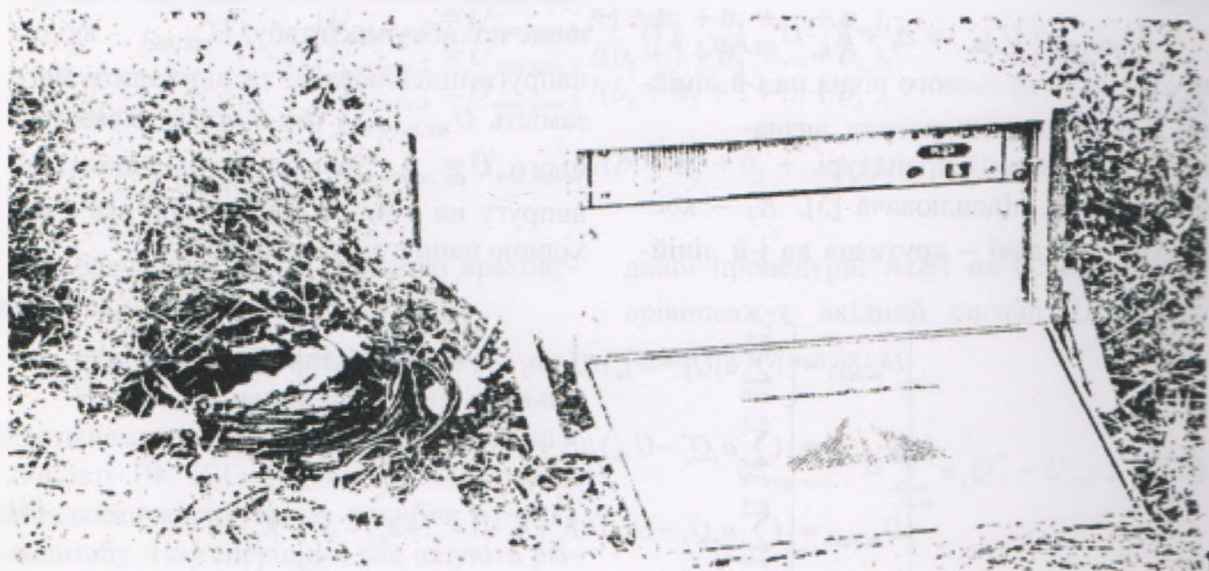


Рис. 5. Система для сейсмозв'язки

Основні характеристики системи для сейсмозв'язки є такими:

- динамічний діапазон вхідного сигналу 120 Дб;
- кількість основних каналів – 240;
- кількість допоміжних каналів – 10;
- розрядність АЦП – 20 біт (16 біт за допомогою самокаліброваного АЦП та 4 біта за допомогою підсилювача);
- підсилювач – із перемиканням піддіапазонів;
- неідентичність підсилення каналів $\pm 0,05\%$;
- смуга пропускання 3-750 Гц.

Основні характеристики системи для акустичних вимірювань (рис. 5) є такими:

- динамічний діапазон вхідного сигналу 140 Дб;
- смуга пропускання 20 Гц – 20 КГц;
- розрядність АЦП – 20 біт (16 біт за допомогою самокаліброваного АЦП та 4 біта за допомогою підсилювача);
- підсилювач – із перемиканням піддіапазонів;
- наявність порту для підключення принтера;
- наявність послідовного порту для підключення до комп'ютера;
- наявність рідиннокристалічного дисплею;
- наявність блоку пам'яті з можливістю перезапису.

Висновки

1. Проаналізовано можливості підвищення точності ІВС шляхом коригування статичних похибок ВК, зокрема нуля та масштабу. Показано, що таке коригування можна здійснювати, включивши в коло калібрування АЦП на основі НПСЧ, що самокалібрується.

2. Проаналізовано похибки комутатора, запропоновано метод їх коригування та отримана відповідна система рівнянь, що дозволяє зменшити загальну статичну похибку ВК, а також зменшити її вплив на кінцеві результати перетворення досліджуваних сигналів. На основі зазначеної системи рівнянь, отримано рівняння перетворення ВК.

3. Розглянуто методи коригування похибок масштабу та нуля ВК, які дозволяють зменшити похибки вимірювання сигналів при пошуку корисних копалин у сейсморозвідці, при акустичних вимірюваннях та визначенні параметрів точок акупунктури людини.

Список літератури

1. Геологические задачи сегодняшнего дня и методы их решения // Приборы и системы разведочной геофизики, 2005. – №4. – С. 6 – 12.

2. Рейхард В. Акустика общественных зданий / Пер. с нем. – М.: Стройиздат, 1984. – 355 с.

3. Азаров О. Д., Галаган О. Я., Звнигородський Е. Л., Снігур А. В. Система вимірювання та реєстрування сигналів БАТ для акупунктурної терапії // Вісник ВПІ, 2005. – №2. – С. 16 – 19.

4. Азаров О. Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2004. – 260 с.

5. Крупельницький Л. В., Азаров О. Д. Аналого – цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів: Монографія. / Під заг. ред. О. Д. Азарова. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005 – 167 с.

6. Азаров О. Д., Архипчук О. А., Захарченко С. М. Високолінійні порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю для систем реєстрації і оброблення аналогових сигналів. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 125 с.

7. Lewis S. H., Ramachandran R. and Snelgrove W. M. Indirect testing of digital-correction circuits in analog-to-digital converters with redundancy // IEEE Trans. Circuit Syst. II. – July 1995. – Vol. CAS – 42. – P. 437 – 445.

8. Walt Kester. Analog-digital conversion. – Analog Devices Inc., 2005. – 675 p.