



УКРАЇНА

(19) UA (11) 42948 (13) U  
(51) МПК (2009)  
H03M 1/22

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під  
відповідальність  
власника  
патенту

### (54) СПОСІБ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ

1

2

(21) u200902279

(22) 16.03.2009

(24) 27.07.2009

(46) 27.07.2009, Бюл.№ 14, 2009 р.

(72) АЗАРОВ ОЛЕКСІЙ ДМИТРОВИЧ, ЗАХАРЧЕНКО СЕРГІЙ МИХАЙЛОВИЧ, БОЙКО ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ

(73) ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(57) Спосіб аналого-цифрового перетворення, який полягає в тому, що на кожному i-ому такті

формують компенсуючий сигнал врівноваження і додатковий компенсуючий сигнал та порівнюють з вхідним аналоговим сигналом, по результатах їх порівняння на всіх тактах формують вихідний код, який відрізняється тим, що після формування вихідного коду компенсуючий сигнал пропонують знаходити шляхом усереднення і на основі усередненого значення калібрують вагу розряду, в результаті чого визначають реальні ваги розрядів перетворювача, які далі використовують в режимі основного перетворення.

Корисна модель відноситься до галузі цифрової вимірювальної і обчислювальної техніки і може бути використана для перетворення аналогових величин в цифрові.

Відомий спосіб аналого-цифрового перетворення (А.с. СРСР №1304172 М.кл. H03M1/26, бюл. №14, 1987), заснований на порозрядному врівноваженні вхідного аналогового сигналу, який полягає в тому, що на кожному i-му такті формують компенсуючий аналоговий сигнал, виконують порівняння вхідного аналогового сигналу з компенсуючим аналоговим сигналом і запам'ятовують результат порівняння, одночасно з формуванням компенсуючого аналогового сигналу формують додатковий аналоговий сигнал величиною

$$\Delta Q = \frac{\sum_{j=i+1}^n Q_j - Q_i + 1}{2}, \text{ де } n - \text{число розрядів коду,}$$

$Q_i$  - вага i-го розряду, і перед порівнянням з вхідним аналоговим сигналом сумують компенсуючий і додатковий аналогові сигнали, а порівняння вхідного аналогового сигналу виконують з сигналом результату сумування, при цьому формування компенсуючого аналогового сигналу виконують на основі надлишкового вимірювального коду з вагами  $Q_i = Q_{i-1} / \alpha$ , де  $1 \leq \alpha < 2$  - основа надлишкового вимірювального коду.

Недоліком цього способу є низька параметрична надійність перетворення, що призводить до

зниження точності при зміні умов навколишнього середовища, зокрема температури.

За прототип обрано спосіб аналого-цифрового перетворення (А.с. СРСР №1388985, М.кл. H03M1/26, бюл. №14, 1988), заснований на порозрядному врівноваженні вхідного аналогового сигналу, який полягає у тому, що на кожному i-му такті формують компенсуючий сигнал врівноваження, який дорівнює сумі основного компенсуючого сигналу порозрядного врівноваження і першого додаткового компенсуючого сигналу такої ж полярності, порівнюють вхідний аналоговий сигнал з сигналом врівноваження, за результатом порівняння на всіх тактах виконують формування вихідного коду, по результату порівняння на i-му такті вхідного аналогового сигналу з сигналом врівноваження у випадку перевищення сигналу врівноваження над вхідним аналоговим сигналом виконують на (i+1)-му такті до формування сигналу врівноваження формують другий додатковий компенсуючий сигнал протилежної полярності, який при формуванні сигналу врівноваження підсумовують з основним і першим додатковим компенсуючим сигналами даного такту, при цьому величину першого додаткового компенсуючого сигналу вибирають рівною  $A_{g1}(i) = Q_i(\alpha^{-1}/2 + K)$ , а величину другого додаткового компенсуючого сигналу рівною  $A_{g2}(i) = Q_i * 2K$ , де  $\alpha$  - основа надлишкового ви-

UA (19) 42948 (13) U

мірювального коду,  $Q_i$  - вага  $i$ -го розряду коду,  $0 < K < \alpha^{-1} / 2$ .

Недоліком способу є низька параметрична надійність перетворення, що призводить до зниження точності при зміні умов навколишнього середовища, зокрема температури.

В основу корисної моделі поставлено задачу створення способу аналого-цифрового перетворення, в якому за рахунок введення процедури самокалібрування, яка полягає у визначенні відносних відхилень ваг старших розрядів шляхом порівняння ваги поточного розряду, що калібрують, із сумою ваг певної групи сусідніх молодших розрядів на базі існуючих між ними математичних співвідношень з подальшим обчисленням коригувальних поправок або коригувальних значень "неточних" розрядів і врахування цих поправок в процесі перетворення, що дозволяє підвищити параметричну надійність і точність при зміні умов навколишнього середовища, зокрема температури.

Поставлена задача досягається тим, що в способі аналого-цифрового перетворення, який полягає в тому, що на кожному  $i$ -ому такті формують компенсуючий сигнал врівноваження і додатковий аналоговий сигнал та порівнюють з вхідним аналоговим сигналом, за результатом їх порівняння на всіх тактах формують вихідний код, після чого калібрують вагу розряду, в результаті чого визначають реальні ваги розрядів перетворювача, які далі використовують в режимі основного перетворення.

На Фіг.1 представлено структурну схему аналого-цифрового перетворювача, що реалізує запропонований спосіб, на Фіг.2 представлено структурну схему генератора калібрувальних сигналів.

Пристрій містить вхідну аналогову шину 18, яку з'єднано з першим інформаційним входом комутатора 2, вихід генератора калібрувальних сигналів 1 з'єднано з другим інформаційним входом комутатора 2, третій інформаційний вхід комутатора 2 з'єднано з шиною нульового потенціалу 17, вихід комутатора 2 з'єднано з першим аналоговим входом схеми порівняння 5, вхід генератора калібрувальних сигналів 1 з'єднано з відповідним виходом шини керуючих сигналів 14 блоку керування 12, другий аналоговий вхід схеми порівняння 5 під'єднано до виходу цифроаналогового перетворювача із ваговою надлишковістю 7, вихід схеми порівняння 5 з'єднано з інформаційною шиною результату порівняння 15, яку з'єднано з інформаційними входами регістру послідовного наближення 9, вхід генератора імпульсів 3 з'єднано з відповідним виходом шини керуючих сигналів 14 блоку керування 12, а вихід генератора імпульсів 3 з'єднано з входом регістру послідовного наближення 9 і входом лічильника адреси 4, лічильника адреси 4 з'єднано з першим входом першого блоку постійної пам'яті 6, другий вхід першого блоку постійної пам'яті 6 з'єднано з відповідним виходом шини керуючих сигналів 14 блоку керування 12, вихід першого блоку постійної пам'яті 6 через шину керуванню відповідним виходом шини керуючих сигналів 14 блоку керування 12 з'єднано з другим

входом блоку елементів АБО 8, виходи регістру послідовного наближення 9 з'єднано з відповідними першими входами блоку елементів АБО 8 і першими входами цифрового обчислювального пристрою 11, виходи блоку елементів АБО 8 з'єднано з відповідними входами цифроаналогового перетворювача із ваговою надлишковістю 7, другий вхід цифрового обчислювального пристрою 11 з'єднано з шиною керуючих сигналів 14 блоку керування 12, третій вхід цифрового обчислювального пристрою 11 з'єднано з другим блоком постійної пам'яті 13, четверті входи цифрового обчислювального пристрою об'єднано з блоком оперативної пам'яті 10, виходи цифрового обчислювального пристрою 11 з'єднано з вихідною цифровою шиною 16. Генератор калібрувальних сигналів 1 містить джерело струму 19, перший вивід якого з'єднано з шиною нульового потенціалу 17, другий вивід джерела струму 19 об'єднано з першою клемою ключового елемента 28. Друга клема ключового елемента 28 з'єднана з першою клемою ключового елемента 20, першою клемою ключового елемента 24, першим виводом конденсатора 21, від'ємним входом підсилювача постійного струму 22. Додатний вхід підсилювача постійного струму 22 з'єднано з шиною нульового потенціалу 17, вихід підсилювача постійного струму 22, що є виходом генератора калібрувальних сигналів 1, з'єднано з другою клемою ключового елемента 20, другим виводом конденсатора 21. Другу клеми ключового елемента 24 з'єднано з першим виводом конденсатора 27 і першою клемою ключового елемента 26. Другу клеми ключового елемента 26 з'єднано з шиною нульового потенціалу 17. Другий вивід конденсатора 27 з'єднано з першою клемою ключового елемента 25 і першою клемою ключового елемента 23, другу клеми ключового елемента 25 з'єднано з шиною нульового потенціалу 17. Другу клеми ключового елемента 23 з'єднано з вхідною шиною 18.

Спосіб аналого-цифрового перетворення реалізується таким чином. Розрядну сітку перетворювача розбивають на групи з  $m$  неточних (старших),  $(n-m)$  точних (молодших) розрядів, причому неточні і точні розряди утворюють групу з  $n$  основних розрядів, визначені ваги  $(n-m)$  точних розрядів фіксують в блоці постійної пам'яті в процесі виготовлення перетворювача. Організацію роботи передбачають у двох режимах: самокалібрування і основного перетворення, причому перший передусе другому. У режимі самокалібрування визначають коди реальних значень ваг розрядів перетворювача і зсуву нуля.

Калібрування ваги  $i$ -го розряду  $Q_i$  АЦП полягає у дворазовому врівноваженні певного допоміжного сигналу, причому перший раз із використанням  $Q_i$ , а другий раз без його використання. Після чого кодовий еквівалент  $K_i$  розрахункового значення ваги розряду, що калібрується може бути знайдений за формулою:

$$K_i = \sum_{j=0}^{i-1} \alpha_j \cdot \hat{E}_j - \sum_{j=0}^{i-1} \alpha_j'' \cdot \hat{E}_j,$$

де  $\alpha_j'$  та  $\alpha_j''$  - відповідно двійкові біти кодів результатів першого та другого перетворення,  $\hat{E}_0 - \hat{E}_{j-1}$  - кодові еквіваленти ваг молодших розрядів.

Для усунення недоліків, пов'язаних із накопиченням похибки квантування пропонується ідея багаторазового калібрування. При застосуванні даного способу один неточний розряд калібрують кілька разів при різних значеннях допоміжного сигналу  $A_{\hat{\alpha}_i}$ . Мінімальне значення допоміжного сигналу  $A_{\hat{\alpha}_{\min}}$  збігається зі значенням ваги розряду, що калібрують, а максимальне  $A_{\hat{\alpha}_{\max}}$  - визначають як суму ваг всіх молодших розрядів. Значення  $A_{\hat{\alpha}_i}$  у випадку  $\alpha_i \in \{1, 0\}$  обчислюють за формулами:

$$A_{\hat{\alpha}_{\min}} = Q_i, i \in [1 \dots n-1];$$

$$A_{\hat{\alpha}_{\max}} = \sum_{j=0}^{i-1} Q_j, i \in [j \dots n-1],$$

де  $A_{\hat{\alpha}_{\min i}}$  та  $A_{\hat{\alpha}_{\max i}}$  - відповідно мінімальне та максимальне значення допоміжного сигналу для калібрування  $i$ -го розряду;

$Q_i = Q_i + \Delta Q_i$ , де  $\Delta Q_i$  - відхилення  $i$ -го розряду, де  $Q_i$  - ідеальне значення  $i$ -го розряду.

Робоче значення допоміжного сигналу  $A_{\hat{\alpha}_i}$  повинно задовольняти умові  $A_{\hat{\alpha}_{\min i}} \leq A_{\hat{\alpha}_i} \leq A_{\hat{\alpha}_{\max i}}$ . При цьому допоміжний сигнал  $A_{\hat{\alpha}}$  при першому і другому калібруваннях дорівнює відповідно:

$$A_{\hat{\alpha}} = K_1 + \sum_{i=0}^{l-1} \alpha_i' \cdot K_i + \Delta_{\text{кв}}'$$

$$A_{\hat{\alpha}} = \sum_{i=0}^{l-1} \alpha_i'' \cdot K_i + \Delta_{\text{кв}}''$$

де  $\Delta_{\text{кв}}'$ ,  $\Delta_{\text{кв}}''$  - похибка квантування відповідно при першому і другому калібруваннях.

На основі попередніх рівностей похибки квантування можуть бути знайдені за формулами:

$$\Delta_{\text{кв}}' = A_{\hat{\alpha}} - \sum_{i=0}^{l-1} \alpha_i' \cdot K_i$$

$$\Delta_{\text{кв}}'' = A_{\hat{\alpha}} - \sum_{i=0}^{l-1} \alpha_i'' \cdot K_i$$

Точки, в яких похибки квантування дорівнюють 0, це точки переключення компаратора, а значення допоміжного сигналу  $A_{\hat{\alpha}}$  в цих точках визначають виразами:

$$A_{\hat{\alpha}_{\text{пер}}'} = \sum_{i=0}^{l-1} \alpha_i' \cdot K_i$$

$$A_{\hat{\alpha}_{\text{пер}}''} = \sum_{i=0}^{l-1} \alpha_i'' \cdot K_i$$

За результатами I-го і II-го врівноважень вагу  $l$ -го розряду можна обрахувати за формулою:

$$K_l = \sum_{i=0}^{l-1} \alpha_i'' \cdot K_i - \sum_{i=0}^{l-1} \alpha_i' \cdot K_i - \Delta_{\text{кв}}'' + \Delta_{\text{кв}}' \text{ або}$$

$$K_l = \sum_{i=0}^{l-1} K_i \cdot (\alpha_i'' - \alpha_i') - \Delta_{\text{кв}}'' + \Delta_{\text{кв}}'$$

Тому результуючу похибку квантування визначають різницею  $\Delta_{\text{кв}}'$  і  $\Delta_{\text{кв}}''$ .

Похибка калібрування приймає як додатні так і від'ємні значення, причому залежність  $(\Delta_{\text{кв}}'' - \Delta_{\text{кв}}')$  має періодичний характер, а період зміни  $T$  дорівнює вазі молодшого розряду. Отже якщо зробити декілька калібрувань протягом одного періоду  $T$ , а результат осереднити за формулою:

$$K_l^* = \frac{\sum S K_l}{S},$$

де  $l$  - номер ітерації,  $S$  - загальна кількість ітерацій, то методичну похибку калібрування можна суттєво знизити. Причому, при  $S \rightarrow \infty$   $K_l^* \rightarrow Q_l'$ .

Після етапу калібрування ваг неточних розрядів визначають зсув нуля  $\Delta A_{\text{зс0}}$ . При цьому на вхід АЦП подають нульову зразкову міру  $A_{\text{вх}} = 0$  і здійснюють її врівноваження, в результаті якого на виході формують кодову комбінацію  $K(\Delta_0)$ . Відповідно до  $K(\Delta_0)$  обчислюють код зсуву нуля за формулою:

$$K_{\text{сн0}} = \sum_{i=0}^{l-1} K_i \cdot \alpha_i$$

де  $\alpha_i$  - розрядні коефіцієнти. Коди реальних ваг розрядів і зсуву нуля фіксують і в подальшому використовують в процесі основного перетворення.

Для підвищення точності калібрування зсуву нуля може бути також застосовано спосіб багаторазового калібрування.

У режимі основного перетворення вхідний аналоговий сигнал  $A_{\text{вх}}$  врівноважують комперсуючим сигналом  $A_{\text{кмп}}$  і в міру формування робочих кодів обчислюють результат перетворення:

$$K_{\hat{\alpha}} = \sum_{i=0}^{n-1} K_i \alpha_i + K_{\text{сн0}}$$

Перед початком самокалібрування по команді блоку керування 12 комутатор 2 підключає вихід генератора калібрувальних сигналів 1 до першого входу схеми порівняння 5, а регістр послідовного наближення 9 встановлюється у нульовий стан керуючим сигналом 14 блоку керування 12. Процес самокалібрування здійснюється послідовно від молодших розрядів до старших, причому першим калібрується  $(n-m)$ -ий розряд. У цьому випадку за допомогою лічильника адреси 4, який отримує імпульси від генератора імпульсів 3, і першого блоку постійної пам'яті 6 через блок елементів АБО 8 на цифровий вхід цифроаналогового пере-

творювача із вагою надлишковістю 7 подається кодова комбінація, яка забезпечує вмикання (n-m)-ого розряду і деяких інших молодших розрядів таким чином, щоб виконувалось співвідношення на виході цифроаналогового перетворювача із вагою надлишковістю 7:

$$A_{\alpha n-m}^0 \geq Q_{n-m} + \Delta Q_{n-m},$$

$$\Delta Q_{n-m} = \delta Q \cdot Q_{n-m}.$$

По команді блоку керування 12 на виході генератора калібрувальних сигналів 1 починає формуватись аналоговий сигнал  $A_{\text{клб}}$ , який лінійно зростає аж доти, поки сигнали на вході схеми порівняння 5 не зрівняються. При цьому схема порівняння 5 спрацьовує. Генератор калібрувальних сигналів 1 являє собою інтегратор на базі операційного підсилювача 22, а також містить джерело струму 19. Для цього по команді блоку керування 12 замикає ключовий елемент 20 і струм зміщення заряджає конденсатор 21. Коли ключовий елемент 20 розмикається, заряд на конденсаторі 21 фіксується і на виході генератора встановлюється постійний рівень напруги. Після розмикання ключового елемента 20 інтегратора блок керування 12 блокує подачу коду з виходу блоку постійної пам'яті 6 і розпочинає процес порозрядного врівноваження, в результаті якого у регістрі послідовного наближення 9 формується код  $N_{n-m}^1$ , який надходить із входу 15. Для точного визначення ваги розряду що калібрується по команді блоку керування 12 ключ 28 розмикається і замикаються ключові елементи 23 і 26, конденсатор 27 заряджається. На наступному етапі ключові елементи 23 і 26 розмикаються, а 24 і 25 замикаються, заряд з конденсатора 27 перетікає у конденсатор 21, формуючи нове значення допоміжного сигналу. Причому ємність конденсатора 27 набагато менша за ємність конденсатора 21. У міру формування вказаного коду і появи значущих розрядів із блоку постійної пам'яті 6 беруться коди цифрових еквівалентів ваг значущих розрядів і послідовно подаються у цифровий обчислювальний пристрій 11, де розраховується:

$$K'_{n-m}(A_{\alpha i-o}^0) = \sum_0^{n-m-1} \alpha_i K_i(A_{\alpha i-o}^0).$$

Далі примусово вимикається (n-m)-ий розряд і проводиться компенсація  $A_{\alpha n-m}^0$ , в процесі чого у цифровому обчислювальному пристрої 11 отримується  $K''_{n-m}$

$$K''_{n-m}(A_{\alpha i-o}^0) = \sum_0^{n-m-1} \alpha_i K_i(A_{\alpha i-o}^0)$$

Після цього знаходиться вага (n-m)-го розряду для допоміжного сигналу  $A_{\alpha n-m}^0$  у вигляді:

$$K_{n-m}^0(A_{\alpha i-o}^0) = K''_{n-m}(A_{\alpha i-o}^0) - K_{n-m}^0(A_{\alpha i-o}^0)$$

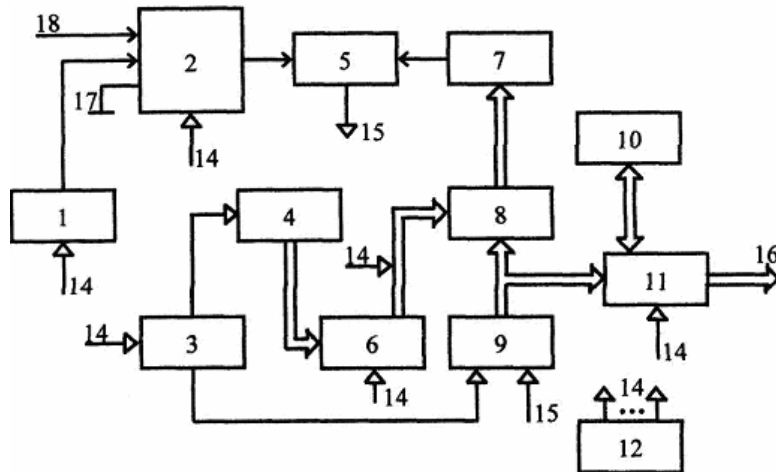
Отриманий код фіксується у блоці оперативної пам'яті 10 у (n-m)-у комірку пам'яті. Далі допоміжний сигнал змінюється з  $A_{\alpha n-m}^0$  на  $A_{\alpha n-m}^1$  і процедура повністю повторюється. Вага розряду отримана за допомогою допоміжного сигналу  $A_{\alpha n-m}^1$  за допомогою цифрового обчислювального пристрою 11 додається до коду, який міститься у блоці оперативної пам'яті 10 у (n-m)-у комірку пам'яті. В результаті вага розряду буде знайдена шляхом осереднення за формулою:

$$K_{n-m} = \frac{\sum_{i=0}^{S-1} K_{n-m}(A_{\alpha i-o}^1)}{S}$$

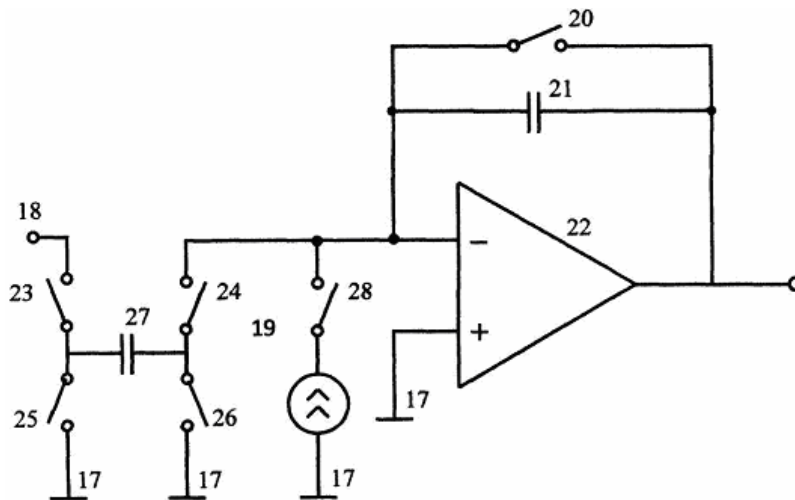
Після цього розпочинається процес калібрування (n-m+1)-го розряду і вона продовжується аж до калібрування старшого (n-1)-го розряду. Після цього аналого-цифровий перетворювач переходить у режим калібрування зсуву нуля. Комутатор 2 підключає перший вхід схеми порівняння 5 до шини нульового потенціалу 17. По команді блоку керування 12 здійснюється процес порозрядного врівноваження вхідного сигналу. У міру формування значущих розрядів у цифровому обчислювальному пристрої 11 обчислюється код зміщення нуля і фіксується у блоці оперативної пам'яті 10. На цьому процес калібрування закінчується і пристрій переходить у режим основного перетворення.

У режимі основного перетворення комутатор 2 підключає перший вхід схеми порівняння 5 до вхідної аналогової шини 18, а також у цифровий обчислювальний пристрій 11 подається код зміщення нуля. Далі розпочинається перетворення вхідного аналогового сигналу  $A_{\text{вх}}$  у вихідний код  $K_{\text{вих}}$ , який передається вихідній цифровій шині 16:

$$K(A_{\text{вх}}) = \sum_0^{n-1} \alpha_i K_i + K_{\text{сн0}}.$$



Фиг. 1



Фиг. 2