

УДК 681.335 (088.8)

АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ЛОГАРИФМІЧНОЮ ХАРАКТЕРИСТИКОЮ ПЕРЕТВОРЕННЯ. ОГЛЯД. ЧАСТИНА 1

© Зиновій Мичуда, 2000

Державний університет "Львівська політехніка", кафедра "Автоматика та телемеханіка",
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Дано означення параметрів, запропоновано критерії оцінки точності та класифікацію, проведено порівняльний аналіз властивостей та вказано перспективи розвитку АЦП з логарифмічною характеристикою перетворення.

Даны определения параметров, предложены критерии оценки точности и классификация, проведен сравнительный анализ свойств и указаны перспективы развития АЦП с логарифмической характеристикой преобразования.

The definition of parameters are given, the criteria of valuation of accuracy and classifications are offered, the comparative analysis of properties is conducted and the prospects of development ADC with logarithmic characteristic of conversion.

1. Вступ

Швидкий розвиток останнім часом комп'ютеризованих систем управління та цифрових засобів обробки інформації сприяли появі значної кількості різноманітних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), які безсумнівно є найнеобхіднішою ланкою, оскільки забезпечують зв'язок цифрових засобів і систем з реальними об'єктами, – зауважимо, що інформація про стан об'єктів переважно більшістю давачів (понад 90%) подається в аналоговій формі. При цьому особливу увагу привертають АЦП з логарифмічною характеристикою перетворення [1-13]. Використання логарифмування дозволяє ефективно розв'язати ряд таких важливих задач, як стиснення динамічного діапазону вхідних сигналів, забезпечення постійного значення відносної похибки перетворення, лінеаризацію характеристик перетворення і значне підвищення продуктивності цифрових процесорів за рахунок забезпечення можливості виконання операцій логарифмічної арифметики. В логарифмічній арифметиці операції множення, ділення, піднесення до степеня чи добування кореня зводяться до операцій додавання, віднімання, множення чи ділення на сталий коефіцієнт відповідно над даними, які подані в логарифмічному масштабі.

АЦП з логарифмічною характеристикою перетворення будемо поділяти на логарифмічні АЦП (ЛАЦП) і квазілогарифмічні АЦП (КЛАЦП). Необхідно підкреслити, що квазілогарифмічні АЦП поступаються логарифмічним, оскільки значення відносної похибки КЛАЦП не є постійним у всьому динамічному діапазоні вхідних сигналів і згаданий діапазон у багатьох випадках є значно вужчим.

Поділ АЦП з логарифмічною характеристикою перетворення на логарифмічні та квазілогарифмічні найлегше зробити за їх структурною реалізацією. Якщо у структурі можна виділити окремо лінійний АЦП і логарифматор, то це – квазілогарифмічний АЦП. У структурній схемі логарифмічного АЦП такий поділ зробити неможливо.

Найбільш поширені КЛАЦП з аналоговими логарифматорами на напівпровідниковому р-п-переході та розрядному RC-колі. Іноді такі перетворювачі називають логарифмічними АЦП [1,2], що не відповідає дійсності.

Після найбільш повного дослідження на дану тематику [1] появився ряд нових: інтегруючі ЛАЦП [3,4] і ЛАЦП на комутованих конденсаторах [5-8].

ЛАЦП на комутованих конденсаторах на даний час мають найвищі метрологічні характеристики, зокрема дозволяють досягти точності та швидкодії такої ж, як і у лінійних АЦП, і, завдяки своїм значно ширшим функціональним мож-

ливостям, починають створювати реальну конкуренцію лінійним АЦП.

Проте ціла низка питань, що стосуються АЦП з логарифмічною характеристикою перетворення, вимагає або уточнення, або вироблення нових критеріїв оцінки. До цих питань у першу чергу належать форми представлення результату, означення параметрів і характеристик, критерії оцінки точності, класифікація та інші.

Дослідженню згаданих вище питань призначена дана робота.

2. Представлення результату

Традиційним є представлення результату логарифмування числа A у вигляді характеристики та мантиси. При цьому, щоб не виникало недоречностей як у деяких роботах [12], не слід залишати поза увагою основних властивостей логарифма і в першу чергу:

- 1) $\log(A) > 0$ при $A > 1$,
- 2) $\log(A) < 0$ при $0 < A < 1$,
- 3) $\log(A) = 0$ при $A = 1$,
- 4) логарифми від'ємних чисел не існують.

Традиційне представлення логарифма (у вигляді характеристики та мантиси) в АЦП з логарифмічною характеристикою перетворення використовується рідко, в основному для зручності інтерпретації отриманого результату людиною [8].

Найчастіше в таких АЦП представляють результат у системі знак-логарифм або позиційним чи число-імпульсним кодом без знаку.

У системі знак-логарифм [9,10] кожне ненульове число представляється його знаком S_A і логарифмом його значення L_A . S_A і L_A відповідно дорівнюють:

- $$S_A = 0, \text{ якщо } A > 1;$$
- $$S_A = 1, \text{ якщо } A < 1;$$
- $$L_A = \log(A).$$

Число A звичайно нормують так, щоб для всіх можливих значень A забезпечити

$$A > 1/\chi \text{ [9,10] або } A < 1/\chi \text{ [11].}$$

Тут χ – масштабуючий множник.

Основа логарифма залежить від цього нормування. У першому випадку за основу береться число 2 [10], а у другому – вибирається певне число ζ в інтервалі $0.5 < \zeta < 1$ [11].

На сьогоднішній день більше уваги надають другому випадку, оскільки з його використанням розширюються функціональні можливості ЛАЦП.

При використанні системи знак-логарифм вхідний діапазон ЛАЦП становить

$$-U_0 \leq U_{BX} \leq U_0,$$

де U_0 – значення опорної напруги.

Підкреслимо, що значення ζ можна вибирати будь-яким у межах $0 < \zeta < 1$, а не в діапазоні $0.5 - 1$, як рекомендується в [11]. Ця рекомендація невиправдано звужує функціональні можливості АЦП. Вибір ζ впливає на ширину динамічного діапазону та значення відносної похибки перетворення. Найменше за абсолютним значенням число, яке може бути представлене перетворювачем, є ζ^{N-1} , де N – кількість станів вихідного слова, в яке входить і біт знака. Це є також і число, яке визначає ширину динамічного діапазону вхідних сигналів перетворювача. Оскільки $\zeta < 1$, то найбільше число, яке може бути представлене, є 1. Отже, інтервал D між $-\zeta^{N-1}$ та ζ^{N-1} може братися як відповідна міра динамічного діапазону [11,12]:

$$D = 2 \zeta^{N-1}.$$

Представлення результату логарифмування позиційним чи число-імпульсним кодом без знака, порівняно із системою знак-логарифм, дещо спрощує схемне рішення АЦП, але звужує вдвічі динамічний діапазон вхідних сигналів, оскільки вхідні сигнали змінюються в межах $U_{BX} \leq U_0$.

Підкреслимо, що реалізація АЦП з представленням результату логарифмування число-імпульсним кодом звичайно є найпростішою.

3. Параметри аналогово-цифрових перетворювачів

Порівнюючи властивості різних АЦП [1-13], приходимо до висновку, що лінійні та квазі-логарифмічні АЦП описуються однаковими параметрами та характеристиками, а логарифмічні АЦП деякими – відрізняються.

3.1. Спільні параметри лінійних і логарифмічних АЦП

Абсолютна похибка перетворення – різниця між номінальним значенням вихідного коду та

значенням коду, встановленим на виході АЦП від зразкового джерела вхідного сигналу номінального значення.

Абсолютна похибка перетворення у кінцевій точці шкали (D_{FS}) – відхилення значення вхідної напруги АЦП від номінального значення, що відповідає кінцевій точці характеристики перетворення. Вимірюється в одиницях молодшого розряду. D_{FS} називають також мультиплікативною похибкою (тут і далі вживатимемо міжнародні [13] позначення).

Напруга зміщення нуля на вході (U_{IO}) – зведене до входу значення напруги, що характеризує відхилення початку характеристики АЦП від заданого значення. Вимірюється в одиницях молодшого розряду.

Монотонність характеристики перетворення – ідентичність знака приросту миттєвих значень вхідного і вихідного сигналів перетворювача.

Час перетворення (t_C) – інтервал часу від моменту деякої зміни сигналу на вході АЦП до появи на його виході відповідного (стійкого) коду. Швидкодія визначається максимальним часом перетворення t_C .

Максимальна частота перетворення ($F_{C_{MAX}}$) – найбільша частота дискретизації, при якій параметри АЦП відповідають встановленим нормам.

Користуються також й іншими параметрами АЦП, найважливіші з яких:

- динамічний діапазон вхідних сигналів (D_R);
- мінімальне, максимальне чи номінальне значення вхідного сигналу;
- вихідна напруга високого рівня (U_{OH});
- вихідна напруга низького рівня (U_{OL});
- струм споживання (I_{CC});
- коефіцієнт розділення каналів (K_C), що визначається рівнем придушення проходження сигналів між каналами перетворювача;
- коефіцієнт впливу нестабільності джерел живлення та опорної напруги.

Температурна стабільність АЦП характеризується температурними коефіцієнтами згаданих вище параметрів.

4. Оцінка точності

Абсолютна похибка Δ_F диференційованої функції $F(X_1, X_2, \dots, X_n)$, що викликається достатньо малими похибками $\Delta_{X_1}, \Delta_{X_2}, \dots, \Delta_{X_n}$ її аргументів X_1, X_2, \dots, X_n , оцінюється виразом

$$\Delta_F = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\partial F}{\partial X_i} * \Delta_{X_i},$$

де $\frac{\partial F}{\partial X_i}$ – часткова похідна функції F по змінній X_i .

Для функції одної змінної $F(x)$ ця формула набирає вигляду

$$\Delta_F = \left| \frac{\partial F}{\partial X} \right| * \Delta_X$$

Отже, абсолютна похибка натурального логарифма

$$\Delta_F = \left| \frac{d(\ln X)}{dX} \right| * \Delta_X = \frac{\Delta_X}{X} = \delta_X,$$

тобто дорівнює відносній похибці його аргументу.

Враховуючи загальновідому формулу переходу від одної основи логарифму до іншої, знайдемо абсолютну похибку логарифма з довільною основою (a)

$$\Delta_F = \frac{\delta_X}{\ln a}.$$

У випадку десяткового логарифма $\Delta_F = 0,4343 \delta_X$.

Для двійкового логарифма $\Delta_F = 3,322 \delta_X$.

Нагадаємо, що звичайно логарифм представляють десятковим дробом, цілу частину якого називають характеристикою, а дробову – мантисою. Характеристика логарифма може змінюватися від 0 до $+Z$ (де Z будь-яке ціле число 1, 2, 3 і т.д.), а мантиса – від 0 до 999(9)...

3.2. Аналогічні параметри лінійних і логарифмічних АЦП

Параметри лінійних АЦП	Параметри логарифмічних АЦП
<p>Кількість розрядів (b) – кількість розрядів коду, яку виробляє АЦП, що чисельно дорівнює двійковому логарифму максимального числа кодових комбінацій на виході АЦП.</p>	<p>Кількість розрядів характеристики (b_x) та мантиси (b_m) – кількість розрядів коду характеристики та мантиси, яку виробляє ЛАЦП, що чисельно дорівнює логарифму за вибраною основою (ζ) від максимального числа кодових комбінацій характеристики та мантиси на виході ЛАЦП.</p>
<p>Роздільна здатність (r) – величина, що визначається кількістю рівнів квантування на характеристиці передачі (перетворення) і дорівнює $r = \frac{1}{2^b}$</p> <p>Вимірюється в двійкових розрядах або відсотках.</p>	<p>Роздільна здатність (r) – величина, що визначається кількістю рівнів квантування на характеристиці передачі (перетворення) і дорівнює $r = \frac{1}{2^{b_x \cdot b_m}}$</p> <p>Вимірюється в децибелах, двійкових розрядах або відсотках.</p>
<p>Коефіцієнт перетворення (G) – відношення приросту вихідного сигналу до приросту вхідного сигналу.</p>	<p>Коефіцієнт перетворення (G) – частка від ділення приросту вихідного сигналу до відношення відповідних йому рівнів вхідного сигналу.</p>
<p>Похибка нелінійності АЦП (d_n) – відхилення від прямої лінії точок характеристики перетворення, що ділять наполовину відстань між середніми значеннями сусідніх рівнів квантування. Вимірюється в одиницях молодшого розряду або у відсотках.</p>	<p>Похибка невідповідності ЛАЦП (d_n) – відхилення від логарифмічної залежності точок характеристики перетворення, що ділять наполовину відстань між середніми значеннями сусідніх рівнів квантування. Вимірюється у децибелах або відсотках.</p>
<p>Диференційна нелінійність (d_{dn}) – відхилення різниці двох сусідніх значень коду від одиниці молодшого розряду. Вимірюється у відсотках від значення діапазону чи в одиницях молодшого розряду. Перевищення d_{dn} одиниці молодшого розряду призводить до немонотонності характеристики перетворення.</p>	<p>Диференційна невідповідність (d_{dn}) – відхилення від значення основи ζ частки від ділення двох вхідних аналогових сигналів, що відповідають сусіднім значенням коду. Вимірюється у децибелах або відсотках. Перевищення d_{dn} значення основи ζ призводить до немонотонності характеристики перетворення.</p>
<p>Крок квантування або абсолютна похибка перетворення (q) – це різниця двох сусідніх рівнів квантування $q = X_i - X_{i-1}$. Він може бути поданий також, як $q = (X_{max} - X_{min}) * r$, де X_{max} і X_{min} – максимальне і мінімальне значення вхідного сигналу відповідно. Для лінійних АЦП $q = const$.</p>	<p>Крок квантування або абсолютна похибка перетворення (q) – це різниця двох сусідніх рівнів квантування $q = X_i - X_{i-1}$ або $q = (1 - \zeta) X_0$, де X₀ – значення опорної величини (міри). Для логарифмічних АЦП $q = var$.</p>
<p>Похибка квантування (δ), або відносна похибка перетворення</p> $\delta = \frac{X_i - X_{i-1}}{X_{i-1}} * 100\%$ <p>Для лінійних АЦП $d = var$.</p>	<p>Похибка квантування (δ) або відносна похибка перетворення</p> $\delta = \frac{X_i - X_{i-1}}{X_{i-1}} * 100\%$ <p>Для логарифмічних АЦП $\delta = \frac{1 - \zeta}{\zeta} * 100\%$ і $\delta = const$.</p>
<p>Зведена похибка (g) квантування – це відношення кроку квантування до номінального значення (чи діапазону зміни) вхідної величини</p> $g = \frac{\delta}{X_n} * 100\%$	<p>Зведена похибка (g) квантування для логарифмічних АЦП збігається з похибкою квантування</p> $g = \delta$

Кількість знаків мантиси визначає точність логарифма і пов'язане з похибкою його аргументу:

Кількість знаків мантиси (десяткових)	1	2	3	4	5
Похибка аргументу (порядок в %)	10	1	0,1	0,01	0.001

Наприклад, щоб забезпечити відносну похибку перетворення в межах 0,1%, необхідно визначити мантису з трьома десятковими знаками.

Розглянемо відносну похибку логарифмічного АЦП. Будь-які два сусідні рівні квантування ЛАЦП відрізняються в одну і ту ж кількість разів, а саме

$$\frac{U_1}{U_0} = \frac{U_2}{U_1} = \dots = \frac{U_n}{U_{n-1}} = \zeta, \quad (1)$$

де ζ – основа логарифму.

Отже, у ЛАЦП абсолютна похибка може бути представлена як різниця двох сусідніх рівнів квантування $U_i - U_{i-1}$, а відносна похибка – як

$$\delta = \frac{U_i - U_{i-1}}{U_{i-1}} * 100\%,$$

$$\text{або } \delta = \frac{1 - \zeta}{\zeta} * 100\%. \quad (2)$$

З останньої формули видно, що відносна похибка ЛАЦП

$$\delta = \text{const}, \quad (3)$$

тобто має постійне значення, яке залежить від основи логарифма.

Ця формула є справедливою як для ЛАЦП зі спадною розгорткою компенсаційної напруги, так і для ЛАЦП – з наростаючою розгорткою.

До даного часу нема однозначного підходу до оцінки точності ЛАЦП і їх похибки не регламентуються жодними стандартами. Тому необхідно виробити критерії оцінки похибок ЛАЦП.

Враховуючи особливість ЛАЦП, зокрема формулу (3), можемо зробити висновок, що для ЛАЦП відпадає потреба у зведеній похибці і їх достатньо характеризувати відотною похибкою перетворення.

За аналогією до похибки нелінійності лінійних АЦП відхилення характеристики перетворення ЛАЦП від логарифмічної функції можна оцінити похибкою невідповідності.

У ЛАЦП порівняно легко компенсуються мультиплікативні похибки: додаванням чи відніманням поправки до результату.

Адитивні похибки в результаті перетворення ЛАЦП (за рахунок дрейфу нуля підсилювачів, компаратора тощо) компенсувати важко. Доцільніше перед початком перетворення компенсувати згадані впливи у кожному елементі зокрема.

5. Класифікація

Аналого-цифрові перетворювачі з логарифмічною характеристикою перетворення можна класифікувати за такими ознаками, як відносна похибка перетворення, структурна реалізація, принцип перетворення чи базовий елемент, використана зразкова міра чи спосіб її відтворення, алгоритм роботи.

Вибравши за головну класифікаційну ознаку відносну похибку перетворення, поділимо АЦП з логарифмічною характеристикою перетворення на два види (див. рисунок а):

- 1) логарифмічні (ЛАЦП) і
- 2) квазілогарифмічні (КЛАЦП).

У ЛАЦП відносна похибка перетворення має постійне значення у всьому динамічному діапазоні вхідних сигналів

$$\delta = \text{const},$$

а у КЛАЦП

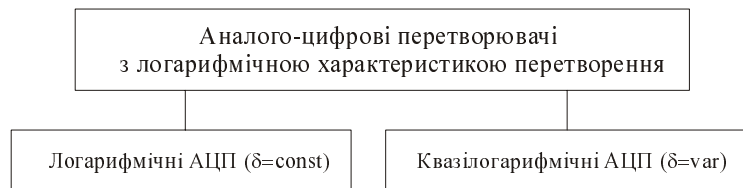
$$\delta = \text{var}.$$

Підкреслимо, вираз $\delta = \text{const}$ свідчить про те, що ЛАЦП перетворюють з однаковою точністю і великі, і малі сигнали, – тоді як у КЛАЦП і лінійних АЦП точність падає пропорційно зменшенню вхідного сигналу.

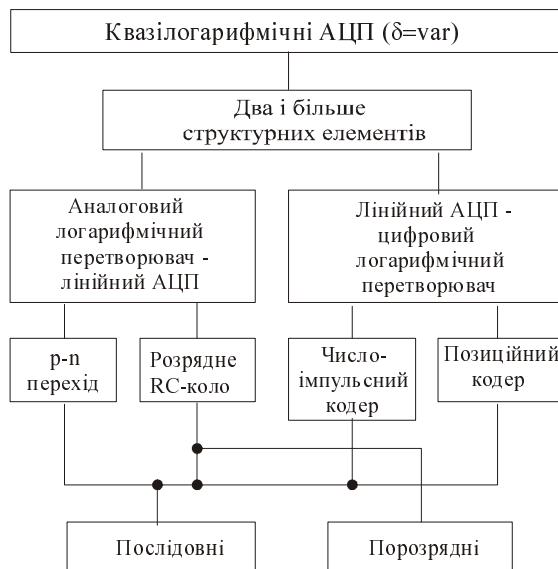
Постійне значення відносною похибки перетворення у всьому динамічному діапазоні вхідних сигналів є найважливішою перевагою ЛАЦП над КЛАЦП і лінійними АЦП.

Класифікація квазілогарифмічних і логарифмічних АЦП, виконана за вище вказаними класифікаційними ознаками, наведена на рисунках б і в.

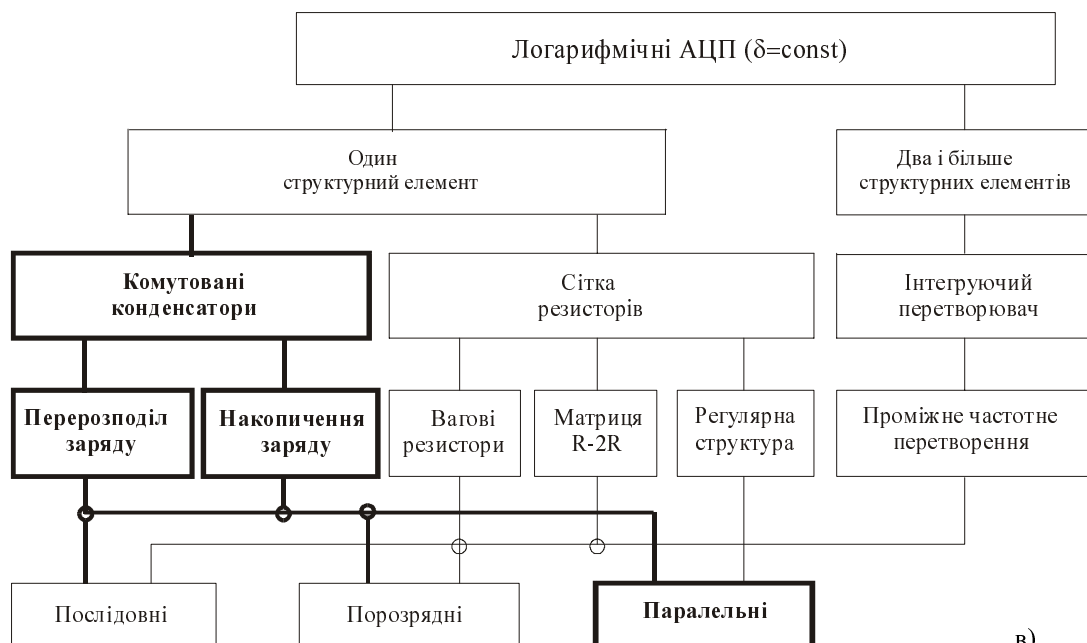
У структурній схемі ЛАЦП неможливо виділити окремо логарифмічний перетворювач (ЛП) чи АЦП.



а)



б)



в)

Класифікація логарифмічних аналого-цифрових перетворювачів

Структурна ж схема КАЦП містить:

1) аналоговий ЛП на вході та лінійний АЦП на виході або

2) лінійний АЦП на вході та цифровий ЛП на виході.

Особливості структурної реалізації значною мірою визначають властивості АЦП з логарифмічною характеристикою перетворення.

КЛАЦП з лінійним АЦП на вході використовуються рідко через вузький динамічний діапазон вхідних сигналів, характерний для лінійних АЦП.

Аналого-цифрові перетворювачі з логарифмічною характеристикою перетворення зручно класифікувати за принципом перетворення чи базовим елементом, зокрема:

а) КЛАЦП поділяються на чотири класи:

1) на р-п-переході напівпровідникового діода чи транзистора;

2) на розрядному RC-колі;

3) з позиційним кодером-логарифматором;

4) з число-імпульсним кодером-логарифматором;

б) ЛАЦП – на три класи:

1) на сітці резисторів;

2) на інтеграторі;

3) на комутованих конденсаторах.

Властивості окремих класів АЦП з логарифмічною характеристикою перетворення будуть розглянуті у продовженні статті (частина 2).

1. Cantarano S., Pallotino G. *Logarithmic Analog-to-Digital Converters: A Survey // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. September, 1973. Vol. IM 22. № 3. P. 201-213.* 2. Ямный В.Е. *Аналого-цифровые преобразователи напряжений в широком динамическом диапазоне. Мн.: Изд-во БГУ, 1980. 3. А.с. 498735 СССР. Логарифмический аналого-цифровой преобразователь / В.А.Тесленко, В.Д.Циделко // Открытия. Изобрет. 1976. №1. 4. А.с. 498735 СССР. Логарифмический аналого-цифровой преобразователь / В.А. Тесленко, В.Д. Циделко // Открытия. Изобрет. 1977. № 7. 5. А.с. 949663 (СССР). Способ определения логарифма / З.Р.Мычуда, В.Б.Дудыкевич // Открытия. Изобрет. 1982. № 29. 6. А.с. 1425726 (СССР). Логарифмический аналого-цифровой преобразователь / З.Р.Мычуда, В.П.Лукашевич // Открытия. Изобрет. 1988. № 35. 7. А.с. 1429136 (СССР). Логарифмический аналого-цифровой преобразователь / З.Р.Мычуда, Н.В.Яворский // Открытия. Изобрет. 1988. № 37. 8. Мычуда З.Р. *Порозрядний логарифмічний аналого-цифровий перетворювач // Міжвід. зб. "Вимірювальна техніка та метрологія". 1998. № 53. С.114-118.* 9. Swartzlander E.E. Jr. and Alexopoulos A.G. *The sign/logarithm number system // IEEE Trans. Computers. 1975. C-24. P. 1238-1242.* 10. Swartzlander E.E. Jr., Satish-Chandra D.V., Troy-Nagle H. and Starks S.A. *Sign/logarithm arithmetic for FFT implementation // IEEE Trans. Computers. 1983. C-32. P. 526-534.* 11. Lang J. *On the design of a special purpose digital control processor // IEEE Trans. Automatic Control. 1984. AC-29. P. 195-201.* 12. Lefas C.C. *A serial charge redistribution logarithmic A/D converter // Int. Journal of Circuit Theory and Applications. 1989. Vol.17. P.47-54.* 13. Федорков Б.Г., Телец В.А., Десяренко В.П. *Микроэлектронные цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи. М. 1984. 120 с.**

УДК 681.2.001.63; 681.3

РЕЗОНАНСНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ І УПРАВЛІННЯ

© Петро Столярчук, Роман Байцар, Микола Гінгін, 2000

Державний університет "Львівська політехніка", кафедра Метрологія, стандартизація та сертифікація",
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Проведено аналіз сучасного стану розроблення і виробництва частотних перетворювачів та їх використання в системах контролю і управління. Показано, що застосування в перетворювачах резонаторів з напівпровідникових ниткоподібних монокристалів суттєво покращує їх метрологічні та експлуатаційні характеристики і відкриває перспективи ширшого впровадження у вимірювально-інформаційних системах.