

З. Р. Мичуда¹, Л. З. Мичуда², Г. С. Єліссєва¹, Б. О. Юськів¹
Національний університет “Львівська політехніка”,
¹кафедра комп’ютеризованих систем автоматки,
²кафедра безпеки інформаційних технологій

ЛОГАРИФМІЧНІ АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ІЗ ЗМІННОЮ ОСНОВОЮ ЛОГАРИФМУ. ВИБІР ОСНОВИ

© Мичуда З. Р., Мичуда Л. З., Єліссєва Г. С., Юськів Б. О., 2019

Досліджено залежність параметрів логарифмічних АЦП із змінною основою логарифму від значення цієї основи. Подано способи вибору бажаного значення основи логарифму для забезпечення потрібної точності та швидкодії ЛАЦП.

Ключові слова: логарифмічні АЦП, класи, параметри, змінна основа логарифму, вибір.

Dependence of logarithmic ADCs parameters with variable logarithm basis on the value of this basis is investigated. Ways to select the desired value of the logarithm basis to provide the desired accuracy and speed logarithmic ADCs.

Keywords: logarithmic ADCs, classes, parameters, the variable basis of the logarithm, choice.

Вступ

Перетворення сигналів, що змінюються у широкому динамічному діапазоні, чотири та більше декад, практично неможливе без застосування перетворювачів із логарифмічною характеристикою перетворення. Такі перетворювачі стискають динамічний діапазон, лінеаризують характеристики сенсорів, дають можливість виконувати операції логарифмічної арифметики над результатом перетворення. Останнє значно збільшує швидкодію засобів і систем, що особливо важливе для систем реального часу, зокрема, систем управління рухом роботів, аеронавігаційних, космічних та інших, в яких затримка в опрацюванні інформації має бути зведена до мінімуму.

У загальному перетворювачі з логарифмічною характеристикою перетворення поділяються на аналогові та аналого-цифрові. Останнім часом найбільше уваги розробників присвячено аналого-цифровим перетворювачам (АЦП), оскільки засоби оброблення інформації майже виключно цифрові, а вихідні сигнали від понад 90 % сенсорів є аналоговими (повільні зміни напруги, струму, опору, ємності тощо).

Своєю чергою, АЦП з логарифмічною характеристикою перетворення поділяють на логарифмічні (ЛАЦП) і квазілогарифмічні (КЛАЦП). Головна відмінність між ними полягає у тому, що у структурній схемі КЛАЦП можна окремо виділити логарифмічний перетворювач і АЦП, а у ЛАЦП таке виокремлення неможливе. За функціональними особливостями ЛАЦП переважають КЛАЦП, оскільки в ЛАЦП похибка квантування є сталою у всьому діапазоні вхідних сигналів, а в КЛАЦП вона змінюється, збільшуючись із зменшенням значення вхідного сигналу (як і у всіх лінійних вимірювальних приладах).

Переважаючі КЛАЦП реалізують за схемою аналоговий логарифмічний перетворювач (на основі р-п переходу напівпровідникового діода чи транзистора або на розрядному RC-колі) і лінійний АЦП. Особливістю таких КЛАЦП є те, що в них забезпечується лише натуральна основа логарифму, а це звужує їх функціональні можливості. Структура КЛАЦП лінійний АЦП і цифровий логарифмічний перетворювач практичного поширення не набула, оскільки динамічний діапазон її визначається лінійним АЦП, тобто фактично є нешироким.

Ця робота присвячена саме логарифмічним аналого-цифровим перетворювачам.

Аналіз літературних джерел

Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі будують на основі: резисторів, інтеграторів і коматованих конденсаторів [1–13].

Резисторні ЛАЦП виконують на вагових резисторах і на матрицях типу R-2R. Останні є більш технологічними при інтегральному виконанні, оскільки мають резистори лише двох номіналів R і 2R. Такі ЛАЦП мають вищі метрологічні характеристики, проте забезпечують лише двійкову основу логарифму. Найпростіша реалізація такого ЛАЦП на цифро-аналоговому перетворювачі (ЦАП) з резистивною матрицею типу R-2R наведена на рис. 1 [1].

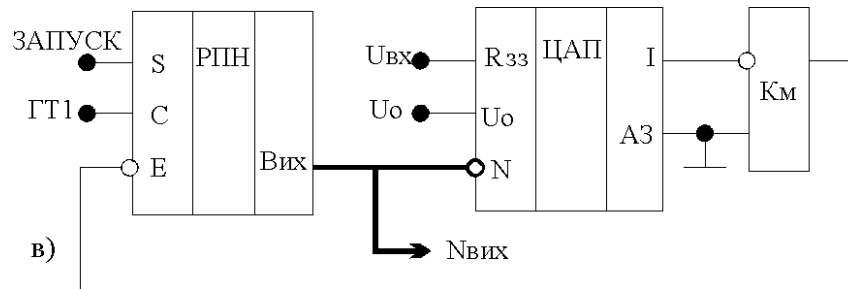


Рис.1. Функціональна схема ЛАЦП на матриці R-2R

Вихідний струм ЦАП I_i зв'язаний з вихідним кодом залежністю

$$I_i = \frac{U_o}{R} \sum_{i=0}^{N-i} \frac{a_i}{2^i},$$

де $a_i = 1$, якщо у i -розряді коду логічна одиниця; $a_i = 0$, якщо у i -розряді коду логічний нуль.

ЛАЦП на матриці резисторів R-2R реалізовано у вигляді інтегральних схем, наприклад, AD7118 фірми Analog Devices, забезпечують похибку перетворення 0,4 дБ, 0,5 дБ або 0,7 дБ відповідно в динамічному діапазоні 30 дБ, 42 дБ або 48 дБ. Їх відносна похибка становить 1,2 % і більше.

Основа логарифму практично застосовуваних резистивних ЛАЦП є двійковою. Така сама основа характерна і для конвеєрних ЛАЦП [2–4].

Інтегруючі ЛАЦП. Їх принцип дії полягає у інтегруванні оберненої функції. Як відомо з математики

$$\int \frac{1}{t} dt = \ln t .$$

Інтегруючий ЛАЦП наведено на рис. 2 [5], де позначено: Км – компаратор; БК – блок керування; Л – лічильник; ОП – операційний підсилювач; ПНЧ – перетворювач напруга – частота; Інт – інтегратор, ФЧР – формувач часу розряду.

Перетворювач напруга-частота ПНЧ відтворює обернено функціональну характеристику перетворення $f = \frac{k}{U_x}$. Використовуючи ПНЧ з імпульсним зворотним зв'язком, забезпечують кількість імпульсів N, записаних у лічильнику Л, що дорівнює натуральному логарифму вхідної напруги

$$N = \frac{RCR_x}{R_o t_p} \ln \frac{U_{BX}}{U_o},$$

де t_s і t_p – час заряду і час розряду конденсатора інтегратора Інт ПНЧ (причому $t_s = RC$), R_o і R_x – опори на опорному та інформаційному входах ПНЧ; U_o – опорна напруга.

Отже, основа логарифма інтегруючих ЛАЦП є натуральна (число e).

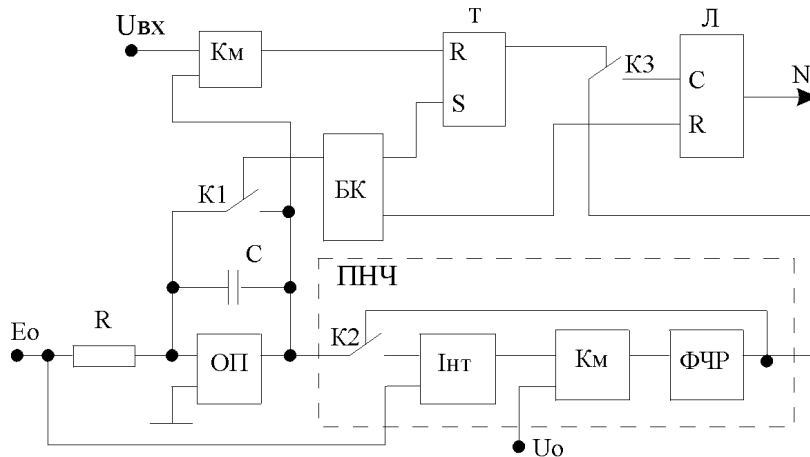


Рис. 2. Схема ЛАЦП на основі інтегратора

ЛАЦП на комутованих конденсаторах [6, 7], вперше створені на кафедрі комп’ютеризованих систем автоматики Національного університету «Львівська політехніка», є останнім досягненням у техніці логарифмічного перетворення. Вони переважають аналогі природним представленням результату у цифровій формі, вищою точністю за однакової швидкодії, більшою технологічністю для інтегрального виконання та дають змогу отримати будь-яке значення основи логарифму. Основою цих ЛАЦП є конденсаторні комірки.

Конденсаторні комірки за способом виконання, зокрема, наявністю чи відсутністю в їх схемі активного елемента, будемо поділяються на пасивні (рис. 3) та активні (рис. 4).

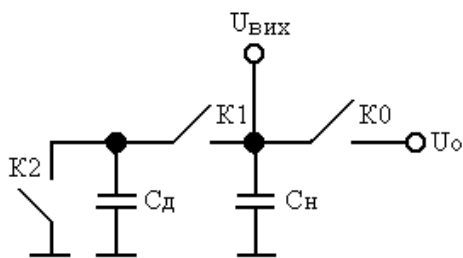


Рис. 3. Пасивна конденсаторна комірка

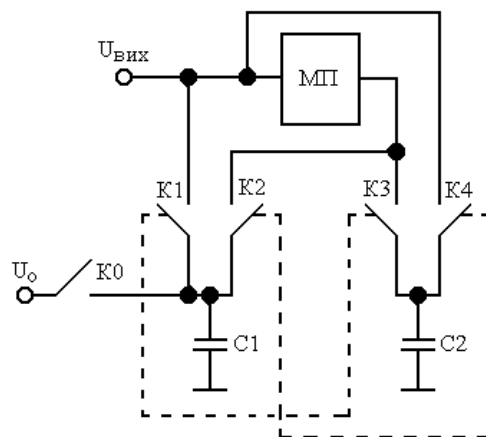


Рис. 4. Активна конденсаторна комірка

У пасивних конденсаторних комірках може мати місце як явище перерозподілу заряду, так і явище накопичення заряду.

Суттєвим з погляду реалізації комірок є те, що у пасивних комірках необхідно вибирати конденсатори так, щоб ємність дозуючого конденсатора C_d була набагато меншою від ємності накопичувального конденсатора C_n , тобто $C_d \ll C_n$.

При цьому, щоб не було втрати точності, ємність дозуючого конденсатора C_d повинна бути значно більшою за паразитні ємності C_n елементів, підключених безпосередньо до дозуючого конденсатора $C_d \gg C_n$.

Очевидно, що для забезпечення високої точності конденсатори комірок треба вибирати прецизійними, полістироловими чи фторпластовими; причому треба мати на увазі, що прецизійних

конденсаторів ємністю, більшою за одиниці мікрофард, нема. Опір витікання таких конденсаторів має найбільше значення і досягає 10^{12} - 10^{13} Ом.

У активних конденсаторних комірках можливе лише явище накопичення заряду. На відміну від пасивних комірок, в активних комірках ємності конденсаторів можуть вибиратися однаковими і лише повинні бути значно більшими від паразитних ємностей елементів, підключених безпосередньо до конденсаторів. Оскільки в активних комірках немає потреби у конденсаторах значної ємності, активні конденсаторні комірки є більш перспективними для ЛАЦП, що розробляються для інтегрального виконання.

ЛАЦП на комутованих конденсаторах зі сталою в процесі перетворення основою логарифма за алгоритмом перетворення є послідовними, рекурентними, паралельними та з імпульсним зворотним зв'язком. Залежність параметрів цих ЛАЦП від основи логарифма досліджено нами в роботі [8].

Проте в ЛАЦП на комутованих конденсаторах із змінною основою логарифма вибір значення основи логарифма часто є неоднозначним, що спричиняє значні труднощі при розробленні ЛАЦП.

Мета роботи

Метою роботи є дослідження впливу основи логарифма на параметри ЛАЦП із змінною в процесі перетворення основою логарифма вибір бажаного значення основи логарифма для спрощення практичної реалізації ЛАЦП із заданими параметрами.

Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі зі змінною в процесі перетворення основою логарифма

До ЛАЦП із змінною основою логарифма належать інтерполяційні, піддіапазонні та порозрядні.

Інтерполяційні ЛАЦП. Найбільшим недоліком послідовних ЛАЦП є великий час перетворення. Зменшити час перетворення можна, використавши метод грубого та точного вимірювання, який полягає у тому, що на першій ділянці перетворення здійснюють швидко, але з великою похибкою квантування, а на другій ділянці шляхом інтерполяції цю похибку компенсують до допустимого значення [7].

Тобто похибка перетворення не перевищуватиме значення похибки квантування на ділянці точного перетворення, а час перетворення значно зменшиться завдяки великим крокам квантування на ділянці грубого перетворення.

Принципи дії інтерполяційних ЛАЦП наступні: перерозподіл заряду, накопичення заряду та поєднання перерозподіл-накопичення заряду.

Вихідним сигналом інтерполяційного ЛАЦП є число-імпульсний код, значення якого пропорційне до логарифма відношення вхідної напруги до опорної напруги.

Інтерполяційні ЛАЦП із перерозподілом заряду. Принцип дії інтерполяційного ЛАЦП з перерозподілом заряду розкриємо за спрощеною схемою (рис. 5) [7], де позначено: K_m – компаратор; ПН – повторювач

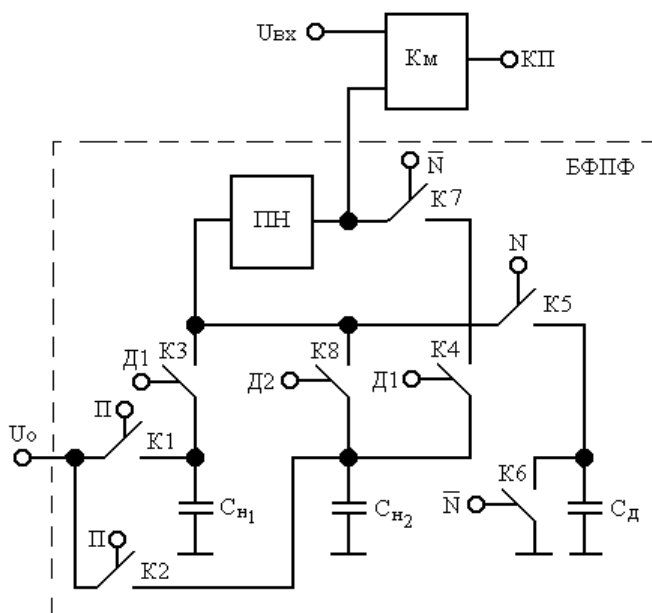


Рис. 5. Спрощена схема інтерполяційного ЛАЦП з перерозподілом заряду

напруги; C_{n1} і C_{n2} – перший і другий накопичувальні конденсатори; C_d – дозуючий конденсатор; $K1$ – $K8$ – аналогові ключі відповідно 1–8; U_o – опорна напруга; N – тактові імпульси; Π – сигнал “Пуск”; $D1$ і $D2$ – сигнали вибору першої та другої ділянок перетворення; $KП$ – вихід “Кінець перетворення”.

З метою підвищення точності ЛАЦП на кожній ділянці здійснюється показникова розгортка компенсаційної напруги.

Задаючи допустиме значення відносної похибки квантування (d_k) на ділянці, знайдемо мінімальне значення основи логарифма за формулою

$$z_{\min} = \frac{1}{1+d_k}. \quad (1)$$

Абсолютна похибка перетворення (D) дорівнює різниці між передостаннім рівнем компенсаційної напруги на другій ділянці (U_2) та вхідним сигналом, $D = U_2 - U_{ex}$ і не перевищує значення

$$D = d_2 U_{ex}. \quad (2)$$

Задаючи на першій ділянці відносну похибку квантування $d_1 = 10\%$, визначимо за вищенаведеною формулою основу логарифма $z_1 = 0,9090909$; аналогічно на другій ділянці для $d_2 = 0,1\%$ знайдемо $z_2 = 0,9990009$.

Оскільки основи логарифма $z_1 = 0,9090909$ відповідає за формулою число дозувань $N_1 = 97$ для діапазону зміни вхідного сигналу від 1 мВ до 10 В, то для більшої зручності представлення результату перетворення приймемо $N_1 = 100$ і уточнимо значення основи логарифма та відносної похибки квантування: $z_1 = 0,9120108$ і $d_1 = 9,6\%$.

Аналогічно уточнимо для другої ділянки: $N_2 = 100$; $z_2 = 0,9990794$ і $d_2 = 0,1\%$.

Остаточно, результат перетворення N дорівнює сумі проміжних результатів перетворення на окремих ділянках і для приведення його до значення одиниці молодшого розряду число дозувань на першій ділянці N_1 треба помножити на 100, оскільки між будь-якими двома рівнями компенсаційної напруги на першій ділянці поміщається 100 рівнів компенсаційної напруги другої ділянки:

$$N = 100N_1 + N_2$$

або

$$N = \frac{100}{\log z_1} \log \frac{U_{ex}}{U_o} + \frac{1}{\log z_2} \log \frac{U_{ex}}{U_1}, \quad (3)$$

де U_1 – передостаннє значення компенсаційної напруги на першій ділянці.

Отже, для перетворення вхідного сигналу 1 мВ – 10 В із похибкою квантування d , не більшою за 0,1%, у розробленому ЛАЦП час перетворення не перевищує 200 періодів тактової частоти (тоді як у ЛАЦП послідовної лічби їх необхідно 10000), тобто швидкодія підвищується у 50 разів.

За рахунок значного зменшення числа дозувань суттєво зменшується інструментальна похибка від впливу паразитних ємностей і струмів витікання ключів. Так, при наведених вище даних у ЛАЦП послідовної лічби вона сягає 0,35%, а у розробленому найпростішому інтерполяційному ЛАЦП не перевищує 0,04%.

Інтерполяційні ЛАЦП з накопиченням заряду. Принцип дії інтерполяційного ЛАЦП із накопиченням заряду розкриємо за допомогою спрощеної схеми рис. 6 [9], де позначено: $KМ$ – компаратор; $МП1$ і $МП2$ – відповідно перший і другий масштабуючі перетворювачі; $C1$ і $C2$ – перший і другий накопичувальні конденсатори; $K0$ – $K6$ – аналогові ключі відповідно 0-6; U_o – опорна напруга; N – тактові імпульси; $D1$ і $D2$ – сигнали вибору; $KП$ – вихід “Кінець перетворення”.

Якщо коефіцієнти передачі МП1 і МП2 a_1 і a_2 вибрати відповідно рівними z_1 і z_2 , то все сказане вище про інтерполяційні ЛАЦП з перерозподілом заряду залишається справедливим і для інтерполяційних ЛАЦП із накопиченням заряду.

Зауважимо лише, що a_1 і a_2 – це основи логарифма інтерполяційних ЛАЦП із накопиченням заряду на першій і другій ділянках перетворення.

Інтерполяційні ЛАЦП із перерозподілом–накопиченням заряду. Принцип дії інтерполяційного ЛАЦП із перерозподілом–накопиченням заряду розкриємо за допомогою спрощеної схеми рис. 7 [10], де позначено:

Км – компаратор, БФПФ – блок формування показникової функції; МП – масштабуючий перетворювач; С1 – накопичувальний конденсатор; С2 – дозуючий конденсатор; К1 – К7 – аналогові ключі відповідно 1–7; U_0 – опорна напруга; N1 і N2 – перша і друга послідовності тактових імпульсів (відповідно на першій і другій ділянках перетворення); КП – вихід “Кінець перетворення”.

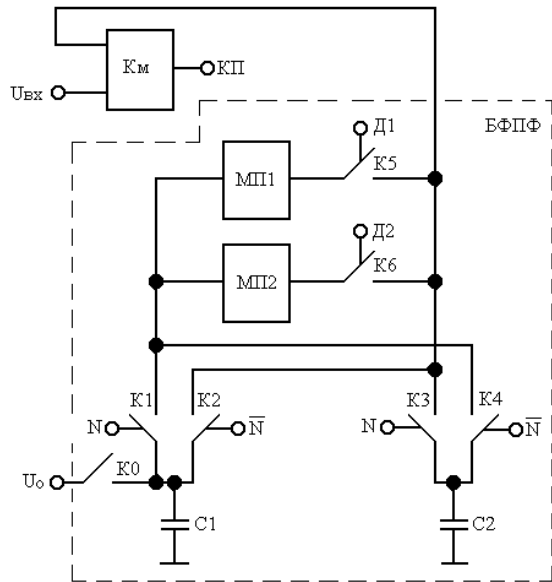


Рис. 6. Спрощена схема інтерполяційного ЛАЦП з накопиченням заряду

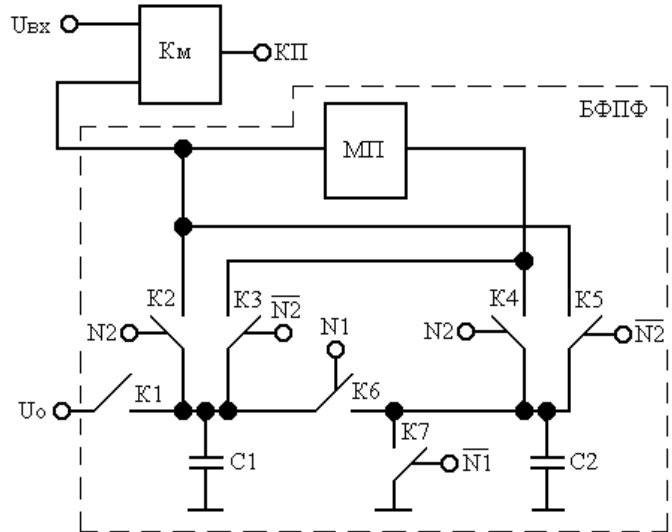


Рис. 7. Спрощена схема інтерполяційного ЛАЦП з перерозподілом–накопиченням заряду

Зазначимо, що на першій ділянці перетворення матиме місце спадна розгортка компенсаційної напруги (основа логарифма $z < 1$), а на другій – наростаюча розгортка (основа логарифма $a > 1$).

Відносні похибки квантування на першій і другій ділянках перетворення відповідно

$$d_1 = \frac{1-z}{z} \quad \text{і} \quad d_2 = \frac{a-1}{a}. \quad (4)$$

Задаючи допустимі значення відносних похибок квантування (d_0), знайдемо мінімальні значення основ логарифма:

$$V_{\min} = \frac{1}{1+d_0} \quad \text{і} \quad a_{\min} = \frac{1}{1-d_0}. \quad (5)$$

Задаючи на першій ділянці допустиме значення відносної похибки квантування $d_0 = 10\%$, визначимо основу логарифма $z = 0,9090909$; аналогічно на другій ділянці для $d_0 = 0,1\%$ знайдемо $a = 1,001001$.

Остаточню, результат перетворення N дорівнює різниці проміжних результатів перетворення на окремих ділянках, і для зведення його до значення одиниці молодшого розряду число дозувань на першій ділянці N_1 треба помножити на 100, оскільки між будь-якими двома рівнями компенсаційної напруги на першій ділянці поміщається 100 рівнів компенсаційної напруги другої ділянки:

$$N = 100N_1 - N_2 \quad \text{або} \quad N = \frac{100}{\log z} \log \frac{U_{BX}}{U_o} - \frac{1}{\log a} \log \frac{U_{BX}}{U_1}. \quad (6)$$

Отже, для перетворення вхідного сигналу 1 мВ – 10 В з похибкою квантування d , не більшою за 0,1 %, у розробленому ЛАЦП час перетворення не перевищуватиме 200 періодів тактової частоти.

Перевагою інтерполяційного ЛАЦП із перерозподілом і накопиченням заряду є зручніше налаштування.

Піддіапазонні ЛАЦП. Принцип дії піддіапазонних ЛАЦП розкриємо за допомогою спрощеної схеми рис. 8, де позначено: Км – компаратор; БУ – блок управління; БФПФ – блок формування показникової функції; ЗВ – задатчик ваги; ПІ – перемножувач імпульсів; ЛР – лічильник результату; ТІ – тактові імпульси; N_y – код управління і N – вихідний код [7].

Суть цього методу полягає у такому.

Розбиваємо діапазон перетворення на m -піддіапазонів і формуємо компенсаційну напругу U_K на кожному c -піддіапазоні (U_{Kc}) за показниковим законом

$$U_{Kc} = U_{Пc} z_c^{n_c}, \quad (7)$$

де n_c – число дозувань на c -піддіапазоні; $U_{Пc}$ – початкове значення напруги на c -піддіапазоні.

На кожному піддіапазоні компенсаційну напругу змінюємо від початкового рівня $U_{Пc}$ до моменту переходу її через рівень вхідного сигналу. Зауважимо, що початковий рівень на першому піддіапазоні дорівнює опорному, тобто $U_{П1} = U_o$.

Число дозувань на c -піддіапазоні пропорційне до логарифма вхідної напруги

$$n_c = \frac{1}{\log z_c} \log \frac{U_{BX}}{U_{Пc}}. \quad (8)$$

Абсолютна похибка перетворення на c -піддіапазоні дорівнює різниці між передостаннім рівнем компенсаційної напруги і вхідним сигналом

$$D_c = U_{Kc} - U_{BX}. \quad (9)$$

Відносна похибка перетворення на c -піддіапазоні залежить від значення основи логарифма на цьому піддіапазоні:

$$d_c = \frac{1 - z_c}{z_c} * 100 \% . \quad (10)$$

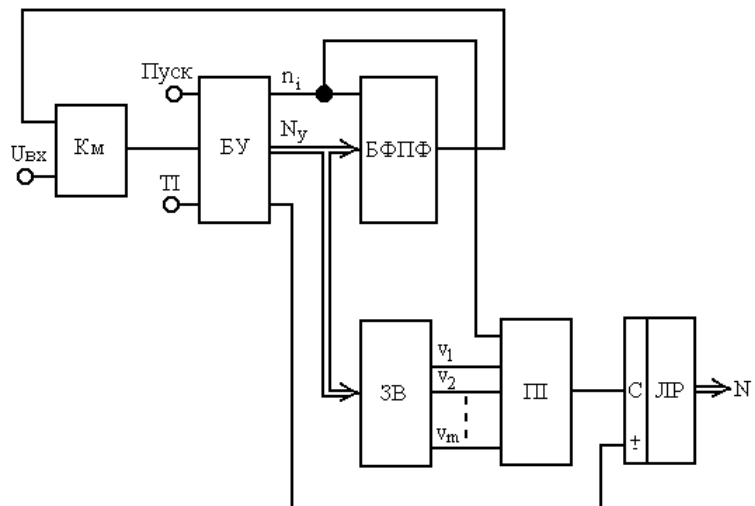


Рис. 8. Узагальнена схема ЛАЦП із змінною основою логарифма

Цю похибку зменшуємо на наступному піддіапазоні зміною значення основи логарифма так, щоб зменшувалася за абсолютним значенням різниця між основою логарифма та одиницею, тобто забезпечуємо умову:

$$z \approx 1 \text{ або } |1 - z_{c+1}| < |1 - z_c|. \quad (11)$$

Що більше відрізняється основа логарифма від одиниці, то більша похибка перетворення і більший крок квантування, проте менше число кроків квантування.

Значення ваги c -піддіапазону n_c треба вибрати як

$$n_c = a^{m-c} \quad (12)$$

або
$$n_c = \frac{d_c}{d_m}, \quad (13)$$

де a – будь-яке додатне число, яке повинно бути більшим від одиниці; m – номер останнього піддіапазону; d_c і d_m – похибки квантування на c - і m -піддіапазонах.

Від значення ваги c -піддіапазону залежить і значення основи логарифма цього піддіапазону.

Результат перетворення знаходимо як алгебраїчну суму добутків числа дозувань n_c і ваги n_c на кожному піддіапазоні.

Відносна похибка перетворення матиме значення

$$d_m = \frac{1 - z_m}{z_m} * 100 \% . \quad (14)$$

Час перетворення дорівнює

$$t_n = \sum_{c=1}^m n_c * T, \quad (15)$$

де T – період повторення тактових імпульсів.

Наприклад, при заданні ваг піддіапазонів за десятковою системою ($a=10$) число дозувань на кожному піддіапазоні не перевищуватиме десяти ($n_{c_{\max}}=10$), що для чотирьох діапазонів перетворення забезпечує час перетворення $t_n \approx 40T$, тобто час перетворення зменшується порівняно з послідовними ЛАЦП у десятки разів (за цієї самої точності).

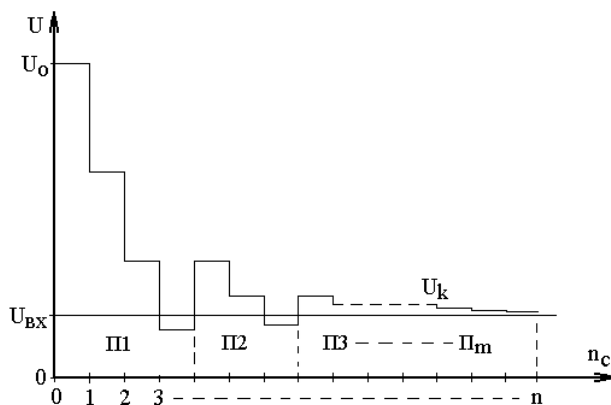


Рис. 9. Етюри напруг ЛАЦП із змінною основою логарифма та односторонньою розгорткою

Піддіапазонні ЛАЦП реалізуються із змінною основою логарифма та одно- або двосторонньою розгорткою компенсаційної напруги [11].

Логарифмічне аналого-цифрове перетворення із зміною основи логарифма і односторонньою розгорткою. Особливість логарифмічного аналого-цифрового перетворення із зміною основи логарифма і односторонньою розгорткою полягає в тому (див. також рис. 9), що на кожному піддіапазоні компенсаційну напругу змінюємо від початкового рівня U_{nc} до моменту

переходу її через рівень вхідного сигналу; причому початковий рівень U_{nc} на c -піддіапазоні задаємо рівним передостанньому значенню компенсаційної напруги на попередньому піддіапазоні:

$$U_{nc} = U_0 \prod_{c=1}^m z_c^{n_c-1}. \quad (16)$$

Нагадаємо, що початковий рівень на першому піддіпазоні дорівнює опорному, тобто $U_{\Pi_c} = U_o$.

Значення основи логарифма на будь-якому с-піддіпазоні задаємо як

$$z_c = \exp\left(\frac{n_c U_{BX_{\min}}}{U_{BX_{\max}}} \ln \frac{U_{BX_{\min}}}{U_o}\right) \text{ при } U_o \geq U_{BX} \quad (17)$$

або

$$z_c = \exp\left(\frac{n_c U_{BX_{\min}}}{U_{BX_{\max}}} \ln \frac{U_{BX_{\max}}}{U_o}\right) \text{ при } U_o \leq U_{BX}. \quad (18)$$

Результат перетворення знаходимо як суму добутків числа дозувань і ваги на кожному піддіпазоні за формулою:

$$N = \overset{m}{\underset{c=1}{\mathop{\text{a}}}} (n_c - 1)n_c \text{ або } N = \overset{m}{\underset{c=1}{\mathop{\text{a}}}} \left(\frac{1}{\log z_c} \log \frac{U_{BX}}{U_{\Pi_c}} - 1 \right) n_c. \quad (19)$$

Логарифмічне аналого-цифрове перетворення із змінною основою логарифма і двосторонньою розгорткою. Особливість логарифмічного аналого-цифрового перетворення із змінною основою логарифма і двосторонньою розгорткою полягає у наступному (див. також рис. 10).

На кожному піддіпазоні компенсаційну напругу змінюємо від початкового рівня U_{Π_c} до моменту переходу її через рівень вхідного сигналу; причому початковий рівень U_{Π_c} на с-піддіпазоні задаємо рівним останньому значенню компенсаційної напруги на попередньому піддіпазоні:

$$U_{\Pi_c} = U_o \overset{m}{\underset{c=1}{\mathop{\text{O}}}} z_c^{n_c}. \quad (20)$$

Нагадаємо, що початковий рівень на першому піддіпазоні дорівнює опорному, тобто $U_{\Pi_c} = U_o$.

Значення основи логарифма на будь-якому с-піддіпазоні задаємо за формулою:

$$z_c = \exp\left(\frac{(-1)^{c-1} n_c U_{BX_{\min}}}{U_{BX_{\max}}} \ln \frac{U_{BX_{\min}}}{U_o}\right) \text{ при } U_o \geq U_{BX} \quad (21)$$

або

$$z_c = \exp\left(\frac{(-1)^{c-1} n_c U_{BX_{\min}}}{U_{BX_{\max}}} \ln \frac{U_{BX_{\max}}}{U_o}\right) \text{ при } U_o \leq U_{BX}. \quad (22)$$

Результат перетворення знаходимо як алгебраїчну суму добутків числа дозувань і ваги на кожному піддіпазоні:

$$N = \overset{m}{\underset{c=1}{\mathop{\text{a}}}} (-1)^{c-1} n_c n_c \text{ або } N = \overset{m}{\underset{c=1}{\mathop{\text{a}}}} \frac{(-1)^{c-1}}{\log z_c} \log \frac{U_{BX}}{U_{\Pi_c}} n_c. \quad (23)$$

Збільшуючи вагу піддіпазону n_c і задаючи відповідне значення основи логарифма z_c на с-піддіпазоні, зменшуємо число дозувань n_c , тобто підвищуємо швидкодію логарифмічних аналого-цифрових перетворювачів.

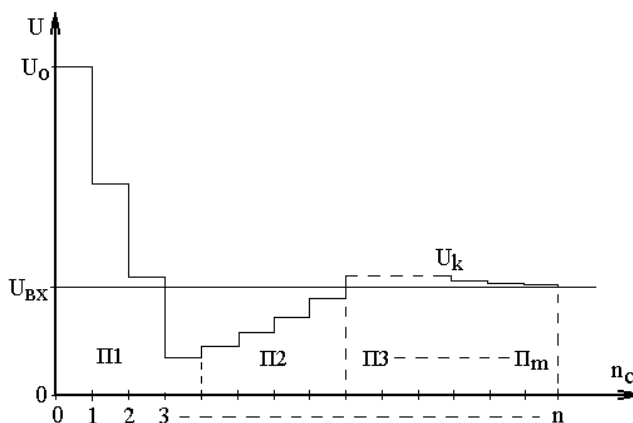


Рис. 10. Епюри напруг ЛАЦП із змінною основою логарифма та двосторонньою розгорткою

Збільшуючи число піддіапазонів, збільшуємо точність перетворення.

Наприклад, при опорній напрузі 10 В розбиваємо діапазон вхідних сигналів від 1 мВ до 10 В на 4 піддіапазони. Визначаємо номінальне значення вихідного коду $N_n = \frac{U_{\text{вхmax}}}{U_{\text{вхmin}}} = 10000$ і знаходимо

похибки квантування на піддіапазонах: $d_4 = \frac{1}{N_n} \times 100\% = 0,01\%$; $d_3 = 10d_4 = 0,1\%$; $d_2 = 10d_3 = 1\%$;

$d_1 = 10d_2 = 10\%$. Значення ваг піддіапазонів знайдемо за формулою (13): $n_4 = 1$; $n_3 = 10$; $n_2 = 100$; $n_1 = 1000$. За наведеними вище формулами (17 і (21)) знаходимо основи логарифма:

а) для односторонньої розгортки: $z_1 = 0,39810$; $z_2 = 0,91201$; $z_3 = 0,99083$ і $z_4 = 0,99908$;

б) для двосторонньої розгортки: $z_1 = 0,39811$; $z_2 = 1,0965$; $z_3 = 0,99083$ і $z_4 = 1,00091$.

Порозрядні ЛАЦП. Суть запропонованого нами порозрядного перетворення [7,12] полягає у тому, що з метою підвищення точності та швидкодії перетворення у кожному наступному розряді змінюється значення основи логарифма і компенсаційна напруга відтворюється як добуток опорної напруги на значення основ логарифма тих розрядів, у яких результат порівняння компенсаційної та вхідної напруг дорівнює або був більший за одиницю.

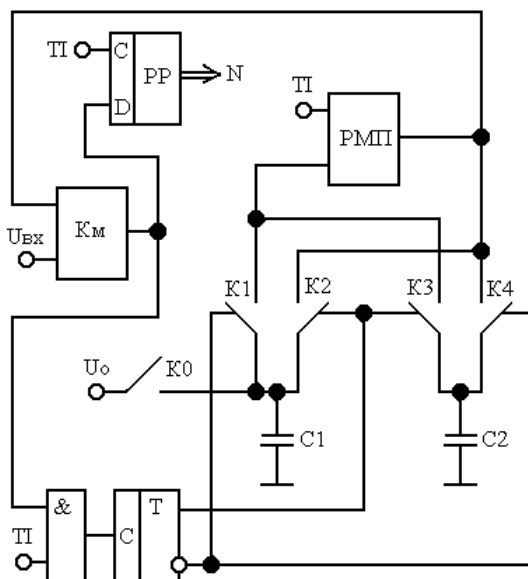


Рис. 11. Спрощена схема порозрядного ЛАЦП із змінною основою логарифма

Спрощену схему порозрядного ЛАЦП із змінною основою логарифма, що ілюструє запропонований принцип перетворення, наведено на рис. 11, де позначено: Км – компаратор; РМП – регульований масштабуючий перетворювач; С1 і С2 – накопичувальні конденсатори 1 і 2; К0 – К4 – аналогові ключі відповідно 0-4; РР – регістр результату; Т – тригер; U_o – опорна напруга; N – вихідний код; ТІ – тактові імпульси.

Значення коефіцієнтів передачі напруги (K_i) по входах управління масштабуючого перетворювача РМП (це зміни основи логарифма з кожним розрядом вихідного коду) задаються для будь-якого і-го входу за формулою

$$K_i = z^{\frac{N_n}{2^i}}, \quad (24)$$

де N_n – номінальне значення вихідного коду, причому $N_n = 2^n$, а $i=1, 2, 3, \dots, n$; z – основа

логарифма наймолодшого розряду вихідного коду, причому $z = const$; $z < 1$ і залежить від потрібної точності.

Основа логарифма z задає значення дискретних приростів коефіцієнта передачі масштабуючого перетворювача РМП; її можна визначити, виходячи з номінального значення вихідного коду N_n за формулою

$$z = e^{N_n^{-1} \ln D^{-1}}, \quad (25)$$

де D – динамічний діапазон вхідних сигналів, що дорівнює відношенню максимального значення вхідної напруги до мінімального.

Після надходження n тактуючих імпульсів компенсаційна напруга (на виході РМП) матиме значення

$$U_n = U_0 * \prod_{i=1}^{n-1} z^{A_i \times \frac{N_n}{2^i}}, \quad (26)$$

де A_i – коефіцієнт, що набуває в кожному i -такті перетворення значення 1 або 0 відповідно до стану компаратора 1 або 0.

Якщо $U_n = U_{\text{ex}}$, то $n+1$ тактуючим імпульсом у регістрі результату РР буде записане двійкове число (N), пропорційне до логарифма відношення вхідної напруги U_{ex} до опорної U_0 :

$$N = \sum_{i=1}^n A_i \times \frac{N_n}{2^i}. \quad (27)$$

Наступним $n+2$ імпульсом ГТІ на виході РР формується сигнал кінець перетворення, що дозволяє зчитування вихідного коду ЛАЦП.

Беручи до уваги, що компенсаційна напруга U_n відтворюється добутком степінних функцій згідно з виразом, і основа цих функцій $z^{\frac{N_n}{2^i}}$ є меншою за одиницю, можемо зробити висновок, що будь-які два сусідні значення U_{n-1} і U_n відрізняються не більше, ніж у значення ваги наймолодшого розряду z разів. Тобто відносна похибка перетворення набуває вигляду (14). Із збільшенням розрядності n відносна похибка перетворення зменшується. Наприклад, при $n = 9$ двійкових розрядів одержимо згідно із $z = 0,9955129$ і забезпечимо $d < 0,5$ %; а при $n = 10$ основа $z = 0,9977539$ і $d < 0,25$ %.

Висновки

Проведені нами дослідження ЛАЦП на комутованих конденсаторах із змінною основою логарифма дають змогу стверджувати наступне:

1. Зміна основи логарифма ЛАЦП в процесі перетворення приводить до значного підвищення швидкодії ЛАЦП.
2. Для зміни основи логарифма ЛАЦП динамічний діапазон вхідних сигналів треба поділити на піддіапазони (ділянки), на кожному з яких задати відповідно інше значення основи, причому з кожною наступною ділянкою це значення щораз більше наближається до одиниці.
3. Значення основи логарифма ЛАЦП на останній ділянці треба вибирати відповідно до заданої похибки квантування ЛАЦП.
4. Значення вагового коефіцієнта на будь-якому s -піддіпазоні доцільно задавати як таке, що дорівнює відношенню похибки квантування на цьому піддіпазоні до похибки квантування на останньому піддіпазоні.

Список літератури

1. *Les convertisseurs logarithmiques pour les signaux a large plage de variations / Jean-Paul Andreotti // Electronique Industrielle. Paris. 1985, No. 96, November, pp. 65–72.*
2. *Jongwoo Lee. A 2.5 mW 80 dB DR 36 dB SNDR 22 MS/s Logarithmic Pipeline ADC/ Jongwoo Lee, Joshua Kang, Sunghyun Park, Jae-sun Seo, Jens Anders, Jorge Guilherme, Michael P. Flynn // IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, vol. 44, 2009, nr.10, pp. 2755–2765.*
3. *Jongwoo Lee. A 64 Channel Programmable Closed-Loop Neurostimulator with 8 Channel Neural Amplifier and Logarithmic ADC/ Jongwoo Lee, Member, Hyo-Gyuem Rhew, Daryl R. Kipke and Michael P. Flynn // IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 45, No. 9, SEPTEMBER 2010, 1935–1945.*
4. *Мичуда З. Р., Мичуда Л. З., Єліссєва Г. С. Інтегральні аналого-цифрові перетворювачі з логарифмічною характеристикою перетворення. Огляд // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” – “Автоматика, вимірювання та керування”, 2017, вип. 880, С. 31–39.*

5. А.с. 547785 СССР. Логарифмический аналого-цифровой преобразователь / В. А. Тесленко, В. Д. Циделко. Бюл.7, 1977.
6. Мичуда З. Р., Дудыкевич В. Б. Способ определения логарифма: А. с. 819948 СССР. 1982, Б.И. 29.
7. Мичуда З. Р. Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі – АЦП майбутнього. Львів: Простір, 2002. 242 с.
8. Мичуда З. Р., Мичуда Л. З., Єлісєєва Г. С. Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі. Основа логарифму // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”: “Автоматика, вимірювання та керування”. 2018. № 907, С. 19–27.
9. Мичуда З. Р., Католик Б. О. Інтерполяційні логарифмічні АЦП з накопиченням заряду // Збірник наукових праць “Комп’ютерні технології друкарства”, 2006, № 16, С. 145–155.
10. Мичуда З. Р., Мичуда Л. З., Католик Б. О. Інтерполюючий логарифмічний аналого-цифровий перетворювач // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”: “Автоматика, вимірювання та керування”. 2002. №. 445, С. 160–166.
11. Патент 43364 Україна. Спосіб логарифмічного аналого-цифрового перетворення / З. Р. Мичуда. 2001. Бюл. № 11.
12. Мичуда З. Р., Яворский Н. В. Логарифмический аналого-цифровой преобразователь: А. с. 1501097 СССР. 1989, Б.И. 30.
13. Zynowij Myczuda, Adam Szcześniak. Analiza logarytmicznego analogowo-cyfrowego przetwornika z sukcesywną aproksymacją z uwzględnieniem pasożytniczych pojemności // Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 2017, T. 7, nr. 2, str. 110–114.

Reference

1. Les convertisseurs logarithmiques pour les signaux a large plage de variations / Jean-Paul Andreotti // *Electronique Industrielle*. Paris. 1985, No. 96, November, pp. 65–72.
2. Jongwoo Lee. A 2.5 mW 80 dB DR 36 dB SNDR 22 MS/s Logarithmic Pipeline ADC/ Jongwoo Lee, Joshua Kang, Sunghyun Park, Jae-sun Seo, Jens Anders, Jorge Guilherme, Michael P. Flynn // *IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS*, vol. 44, 2009, nr.10, pp. 2755–2765.
3. Jongwoo Lee. A 64 Channel Programmable Closed-Loop Neurostimulator with 8 Channel Neural Amplifier and Logarithmic ADC/ Jongwoo Lee, Member, Hyo-Gyuem Rhew, Daryl R. Kipke and Michael P. Flynn // *IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS*, Vol. 45, No. 9, SEPTEMBER 2010, 1935–1945.
4. Mychuda Z. R., Mychuda L. Z., Yelisieieva H. S. Integralni analoho-tsyfrovі peretvoriuvachi z loharyfmichnoiu kharakterystykoiu peretvorennia. Ohliad // *Visnyk NULP – Avtomatyka, vymiriuvannia ta keruvannia*, L.: NULP, 2017, vyp. 880, s. 31–39.
5. А. с. 547785 SSSR. Лoharyfmicheskyi analoho-tsyfrovoyi preobrazovatel / V. A. Teslenko, V. D. Tsydelko // *Biul.* 7, 1977.
6. Mychuda Z. R., Dudykevych V. B. Sposob opredeleniya loharyfma: А. с. 819948 SSSR. 1982, B. Y. 29.
7. Mychuda Z. R. Loharyfmichni Analoho-Tsyfrovі peretvoriuvachi – ATsP maibutnoho. Lviv: Prostir, 2002. 242 s.
8. Mychuda Z. R., Mychuda L. Z., Yelisieieva H. S. Loharyfmichni analoho-tsyfrovі peretvoriuvachi. Osнова loharyfmu // *Visnyk NULP – Avtomatyka, vymiriuvannia ta keruvannia*, L.: NULP, 2018, vyp. 907, s. 19–27.
9. Mychuda Z. R., Katolyk B. O. Interpoliatsiini loharyfmichni ATsP z nakopychenniam zariadu // *Zbirnyk naukovykh prats “Kompiuterni tekhnolohii drukarstva”*, 2006, No. 16, s. 145–155.
10. Mychuda Z. R., Mychuda L. Z., Katolyk B. O. Interpoliuiuchyи loharyfmichni analoho-tsyfrovі peretvoriuvach // *Visnyk NULP – Avtomatyka, vymiriuvannia ta keruvannia*, 2002, vyp. 445, s. 160–166.
11. Patent 43364 Україна. Sposib loharyfmichnoho analoho-tsyfrovoho peretvorennia / Mychuda Z. R. 2001, *Biul.* No. 11.
12. Mychuda Z. R., Yavorskyi N. V. Loharyfmicheskyi analoho-tsyfrovoyi preobrazovatel: А. с. 1501097 SSSR. 1989, B.Y. 30.
13. Zynowij Myczuda, Adam Szcześniak. Analiza logarytmicznego analogowo-cyfrowego przetwornika z sukcesywną aproksymacją z uwzględnieniem pasożytniczych pojemności // *Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 2017, T. 7, nr. 2, str. 110–114.