

З. Р. Мичуда¹, Л. З. Мичуда², Г. С. Єліссєва¹

Національний університет “Львівська політехніка”,

¹кафедра комп’ютеризованих систем автоматики,²кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів

ЛОГАРИФМІЧНІ АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ. ОСНОВА ЛОГАРИФМА

© Мичуда З. Р., Мичуда Л. З., Єліссєва Г. С., 2018

Досліджено залежність основи логарифма від похибки квантування та вихідного коду логарифмічних АЦП різних класів. Подано способи вибору бажаного значення основи логарифма для спрощення практичної реалізації логарифмічних АЦП.

Ключові слова: логарифмічні АЦП, класи, властивості, основа логарифма, вибір.

Dependence of basis to logarithm from the error of quantum and output code of logarithmic ADCs of different classes is investigated. The methods of choice of desired value of basis to logarithm for simplifying the practical realization of logarithmic ADCs are given.

Key words: logarithmic ADCs, classes, properties, basis to logarithm, choice.

Вступ

В останні десятиріччя створено множини АЦП, які перетворюють найрізноманітніші фізичні величини (напругу, струм, опір, ємність, індуктивність, тиск, рівень, деформацію, переміщення тощо) на цифру. Точність і швидкодія комп’ютеризованих систем залежить передусім від параметрів і характеристик АЦП.

Більшість АЦП лінійні – залежність їх вихідного сигналу від вхідного є лінійною функцією.

Останнім часом особливу увагу привертають АЦП з логарифмічною характеристикою перетворення. Використання логарифмування дозволяє ефективно розв’язати такі важливі задачі, як стиснення динамічного діапазону вхідних сигналів, забезпечення сталого значення відносної похибки перетворення, лінеаризацію характеристик перетворення і можливість виконання операцій логарифмічної арифметики. У логарифмічній арифметиці операції множення, ділення, піднесення до степеня чи добування кореня зводяться відповідно до операцій додавання, віднімання, множення чи ділення на сталий коефіцієнт даних, поданих у логарифмічному масштабі.

Логарифмічні перетворювачі є фактично незамінними функціональними вузлами найрізноманітніших технічних засобів, призначених для роботи із сигналами, що змінюються у широкому динамічному діапазоні (чотири і більше декад). За виглядом вхідних і вихідних сигналів їх можна поділити на аналогові та аналого-цифрові перетворювачі.

Аналіз літературних джерел

АЦП з логарифмічною характеристикою перетворення поділяють на логарифмічні АЦП (ЛАЦП) і квазілогарифмічні АЦП (КЛАЦП). Необхідно підкреслити, що квазілогарифмічні АЦП поступаються логарифмічним, оскільки значення відносної методичної похибки КЛАЦП не є сталим 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 виконати за їх структурною схемою. Якщо у структурі можна виділити окремо лінійний АЦП і логарифмічний перетворювач, то це – квазілогарифмічний АЦП. У структурній схемі логарифмічного АЦП такий поділ здійснити неможливо.

Найпоширеніші КЛАЦП побудовані за структурною схемою: аналоговий логарифмічний перетворювач (АЛП) і лінійний АЦП. Своєю чергою, АЛП реалізують на основі р–п-переходу напівпровідникового діода чи транзистора (рис. 1) або на розрядному RC-колі (рис. 2).

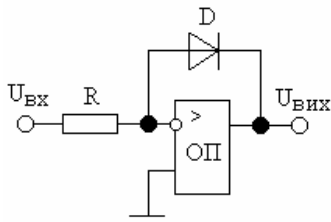


Рис. 1. АЛП на р-п переході

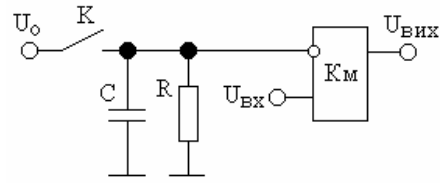


Рис. 2. АЛП на розрядному RC-колі

У АЛП на р–п-переході напівпровідникового діода чи транзистора (рис. 1) вихідна напруга зв'язана з вхідною напругою залежністю [1, 2]

$$U_{\text{ВИХ}} = \varphi_T \left(\ln \frac{U_{\text{ВХ}}}{R I_{\text{КО}}} - \ln \alpha \right),$$

де φ_T – тепловий потенціал, що дорівнює $\varphi_T = \frac{kT}{q}$; $I_{\text{КО}}$ – некерований струм колектора; α – коефіцієнт передачі струму у схемі вмикання транзистора зі спільною базою; T – температура р–п-переходу за Кельвіном; k – стала Больцмана; q – заряд електрона.

У АЛП на розрядному RC-колі (рис. 2) логарифм визначається [1] за часом розрядження конденсатора

$$t = RC \ln \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_0},$$

де R і C – опір і ємність розрядного кола; $U_{\text{ВХ}}$ і U_0 – вхідна та опорна напруги.

Як видно з характеристик перетворення, ці перетворювачі забезпечують отримання лише основи натуральних логарифмів.

Логарифмічні АЦП будують на основі: резисторних матриць, інтеграторів і комутованих конденсаторів.

ЛАЦП на резисторних матрицях реалізують на вагових резисторах і на матрицях R-2R [3]. Найпоширеніші ЛАЦП другого виду, оскільки мають вищі метрологічні характеристики та технологічніші у виготовленні, бо містять резистори лише двох номіналів R і $2R$ (рис. 3). Такі ЛАЦП забезпечують двійкову основу логарифма.

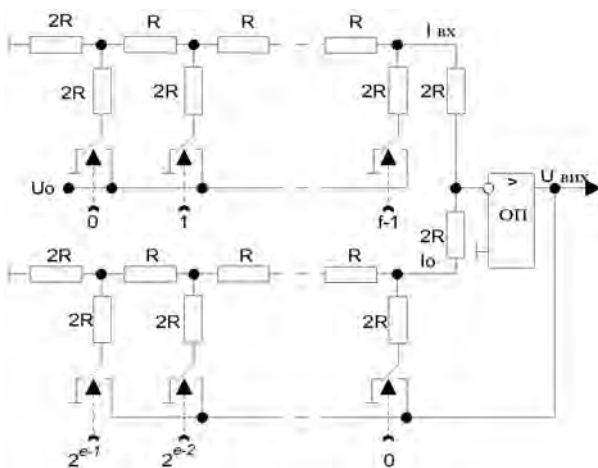


Рис. 3. Функціональна схема ЛАЦП на матриці R-2R

Струм $I_{\text{ВХ}}$, який надходить на інвертуючий вхід операційного підсилювача, дорівнює сумі струмів, що течуть через резистори $2R$ тих розрядів, де у вхідному коді є логічна одиниця

$$I_{\text{ВХ}} = \frac{1}{2} \frac{U_0^*}{3R} \frac{F}{2^f},$$

струм зворотного зв'язку I_0

$$I_0 = \frac{1}{2} \frac{U_0^*}{3R} 2^{-E},$$

де $U_0^* = \frac{U_0}{2^2}$.

Напруга на виході операційного підсилювача

$$U_{\text{ВИХ}} = \frac{U_0^*}{2^f} F 2^E.$$

Вихідний код можна подати з плаваючою комою як

$$N = F * 2^E,$$

де $F = \sum_{i=0}^{f-1} 2^i x_i$; $E = \sum_{i=0}^{2^e-1} 2^i y_i$,

де F – значення мантиси; E – значення характеристики.

Якщо замкнутий i -ключ $x_i=1$ і $y_i=1$, а якщо розімкнутий i -ключ $x_i=0$ і $y_i=0$.

Основа логарифма практично застосовуваних ЛАЦП на резистивних матрицях є двійковою. Така сама основа характерна і для конвеєрних ЛАЦП [4, 5].

У ЛАЦП на основі інтеграторів [6] використовується принцип інтегрування оберненої функції. Загальновідомо, що

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

Таку функцію реалізують через проміжне частотне перетворення.

Схему ЛАЦП на основі інтегратора наведено на рис. 4 [6], 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 вихідну частоту ПНЧ

$$f = \frac{1}{t_3 + t_p} = \frac{U_0 R_0}{U_X R_X t_p},$$

де t_3 і t_p – час заряджання і час розряджання конденсатора інтегратора Інт ПНЧ, R_0 і R_X – опори на опорному та інформаційному входах ПНЧ, U_0 – опорна напруга.

Якщо забезпечити $t_3 = RC$, то

$$N = \frac{RCR_X}{R_0 t_p} \ln \frac{U_{BX}}{U_0}.$$

Кількість імпульсів N , записаних у лічильнику L , дорівнює натуральному логарифму вхідної напруги.

Отже, з проведеного вище огляду традиційних принципів побудови ЛАЦП випливає, що у цих ЛАЦП реалізуються лише натуральні та двійкові основи логарифма.

ЛАЦП на комутованих конденсаторах [7–11] є останнім досягненням у техніці логарифмічного перетворення. Вони мають низку переваг над своїми попередниками, зокрема: природне подання результату в цифровій формі, більшу точність за однакової швидкодії, технологічніші за інтегральним виконанням та дають змогу отримати будь-яке значення основи логарифма.

Оскільки у ЛАЦП на комутованих конденсаторах перетворення вхідних сигналів може здійснюватися як зі сталою основою логарифма, так і зі змінною, то вибір значення основи логарифма часто неоднозначний, що спричиняє великі труднощі під час розроблення ЛАЦП.

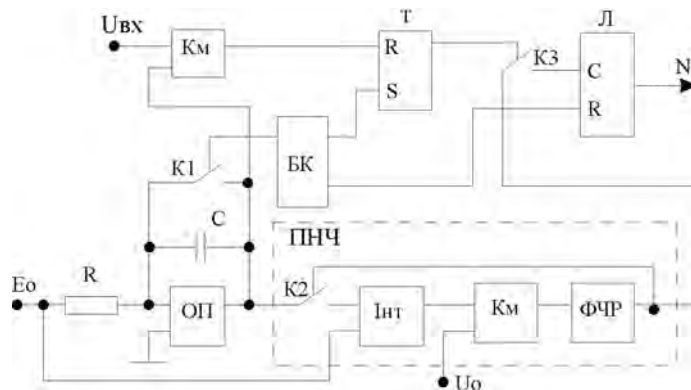


Рис. 4. Схема ЛАЦП на основі інтегратора

Мета роботи

Метою роботи є дослідження взаємозв'язку основи логарифма з похибкою квантування та вихідним кодом логарифмічних аналого-цифрових перетворювачів різних класів і вибір бажаного значення основи логарифма для спрощення практичної реалізації ЛАЦП.

Логарифмічні АЦП зі сталою під час перетворення основою логарифма

ЛАЦП зі сталою в процесі перетворення основою логарифма за алгоритмом перетворення можуть бути послідовними, рекурентними та паралельними.

За реалізацією конденсаторної комірки (КК) ЛАЦП поділяють на:

- ЛАЦП на пасивних конденсаторних комірках (рис. 5);
- ЛАЦП на активних конденсаторних комірках (рис. 6);
- ЛАЦП з імпульсним зворотним зв'язком (рис. 7).

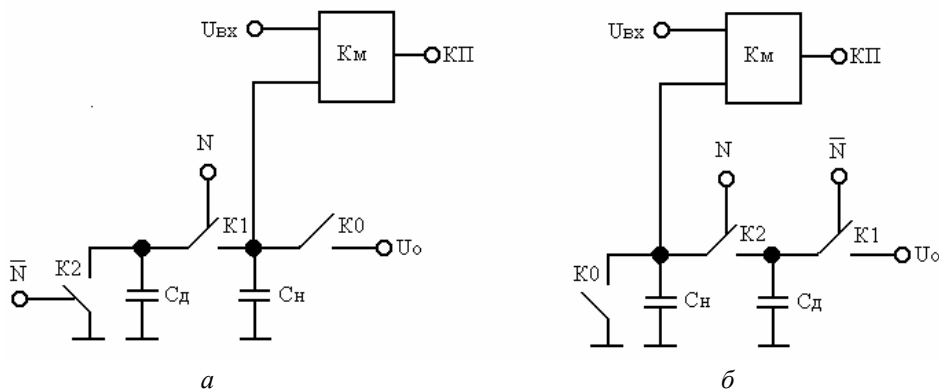


Рис. 5. Спрощена схема ЛАЦП на пасивній конденсаторній комірці:
а – з перерозподілом заряду; б – з накопиченням заряду

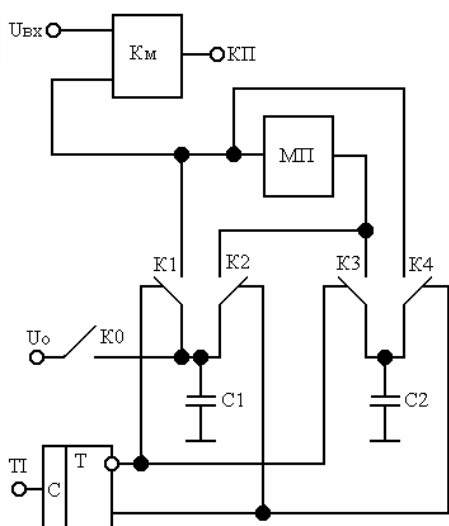


Рис. 6. Спрощена схема ЛАЦП на активних конденсаторних комірках

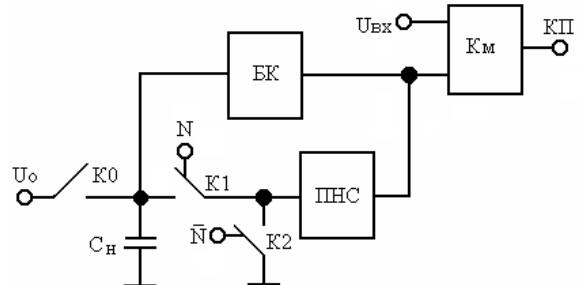


Рис. 7. Спрощена схема ЛАЦП з імпульсним зворотним зв'язком

У ЛАЦП зі сталою основою логарифма значення двох сусідніх рівнів компенсаційних напруг відрізняються в основі логарифма (O) у разів:

$$\frac{U_1}{U_0} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_3}{U_2} = \dots = \frac{U_n}{U_{n-1}} = O \quad (1)$$

Перетворення закінчується, коли на n -му такті компенсаційна напруга зрівняється із вхідною, тобто

$$U_n = U_{вх} \quad (2)$$

Тоді значення компенсаційної напруги матиме значення

$$U_n = O^n \cdot U_0, \quad (3)$$

а вихідний код ЛАЦП –

$$N = \frac{1}{\log o} \log \frac{U_{BX}}{U_0}, \quad (4)$$

тобто пропорційний до логарифма відношення вхідної напруги до опорної.

За цією формулою визначаємо основу логарифма як

$$o = e^{\frac{1}{N} \ln \frac{U_{BX}}{U_0}}. \quad (5)$$

Задаючи, наприклад, діапазон зміни вихідного коду ЛАЦП $N=0 \div 10000$ у діапазоні вхідних сигналів $U_{BX}=1 \text{ мВ} \div 10 \text{ В}$ за опорної напруги $U_0=10 \text{ В}$, знаходимо значення основи логарифма $o = 0,999$.

Компенсаційна напруга змінюється за законом показникової функції o^x . За основи логарифма $o < 1$ розгортка компенсаційної напруги спадна, а якщо $o > 1$, розгортка наростає.

У ЛАЦП на пасивних конденсаторних комірках відбувається перерозподіл або накопичення заряду, проте розгортка компенсаційної напруги лише спадна.

У ЛАЦП на активних конденсаторних комірках існує тільки накопичення заряду, проте розгортка компенсаційної напруги може бути як спадною, так і з наростанням.

Абсолютна похибка компенсаційної напруги дорівнює її приросту на останньому такті перетворення, тобто

$$\Delta U_n = o^{n-1} \cdot (o-1) \cdot U_0. \quad (6)$$

Відносну похибку квантування (δ_k) можна визначити із виразів (3) і (6) як відношення $\Delta U_n / U_n$ у відсотках, тобто

$$\delta_k = \frac{1-o}{o} \cdot 100\%, \text{ якщо } o < 1 \quad (7)$$

$$\delta_k = \frac{o-1}{o} \cdot 100\%, \text{ якщо } o > 1. \quad (8)$$

Наприклад, за основи логарифма $o = 0,999$ похибка квантування δ_k не перевищує 0,1 %.

Задаючи допустиме значення відносної похибки квантування (δ_d), мінімальне значення основи логарифма можна визначити як

$$o_{\min} = \frac{1}{1 + \delta_d / 100\%}. \quad (9)$$

Щоб зручніше розрізняти різні класи ЛАЦП, введемо позначення основи логарифма:

- для ЛАЦП на пасивних КК $o \equiv \zeta$;
- для ЛАЦП на активних КК $o \equiv \alpha$;
- для ЛАЦП з імпульсним зворотним зв'язком $o \equiv \xi$.

ЛАЦП із перерозподілом заряду [7, 8]. Вихідний код ЛАЦП із перерозподілом заряду

$$N = \frac{1}{\log \zeta} \log \frac{U_{BX}}{U_0}, \quad (10)$$

де ζ – основа логарифма, яка визначає значення дозованих кількостей електрики, залежить від співвідношення ємностей накопичувального (C_H) та дозувального (C_D) конденсаторів згідно з виразом

$$\zeta = \frac{C_H}{C_H + C_D}. \quad (11)$$

Відносну похибку квантування (δ_k) можна визначити за виразами (7) і (11) як

$$\delta_k = \frac{C_D}{C_H} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Задавши похибку квантування $\delta_K = 0.1\%$, отримаємо $C_D = 0.001C_H$. Вибравши $C_H = 1 \text{ мкФ}$, отримаємо $C_D = 1 \text{ нФ}$.

Як видно з виразу (12), відносна похибка квантування не залежить від значення вхідного сигналу і стала у всьому діапазоні.

Задаючи допустиме значення відносної похибки квантування (δ_D), мінімальне значення основи логарифма можна знайти за формулою (8).

ЛАЦП з накопиченням заряду на пасивних КК [8]. Для цих перетворювачів вибір значень ємностей накопичувального C_H та дозувального C_D конденсаторів, а також співвідношення між похибкою квантування δ_K , основою логарифма α і вихідним кодом N такі самі, як і у ЛАЦП з перерозподілом заряду.

ЛАЦП з накопиченням заряду на активних КК [8]. У цих перетворювачах основа логарифма (α) задається значенням коефіцієнта передачі регульованого масштабного перетворювача (МП) та може бути як більшою, так і меншою від одиниці. Їх вихідний код дорівнює

$$N = \frac{1}{\ln \alpha} \ln \frac{U_{BX}}{U_0}. \quad (13)$$

У разі виконання МП у вигляді неінвертуючого підсилювача напруги на операційному підсилювачі основа логарифма α набуде вигляду

$$\alpha = 1 + \frac{R_2}{R_1}, \quad (14)$$

де R_2 – опір резистора, увімкненого між виходом й інвертуючим входом операційного підсилювача; R_1 – опір резистора, увімкненого між інвертуючим входом операційного підсилювача та шиною нульового потенціалу.

У такому ЛАЦП спрацьовування компаратора K_m відбуваються синхронно з тактовими імпульсами. Тому похибка від несинхронності δ_{nc} у ньому не виникає.

Похибка перетворення визначатиметься лише похибкою логарифма $\ln \alpha$. Як загальновідомо, абсолютна похибка логарифма дорівнює відносній похибці його аргумента

$$\Delta_{\ln} = \delta_\alpha = \delta_{R_2} - \delta_{R_1}, \quad (15)$$

де δ_α – відносна похибка аргумента α ; δ_{R_2} і δ_{R_1} – відносні похибки резисторів R_2 і R_1 .

Використовуючи змінні резистори, можна установити $\delta_{R_2} = \delta_{R_1}$, тобто звести похибку логарифма практично до нуля.

ЛАЦП з імпульсним зворотним зв'язком [9]. Особливістю цих ЛАЦП є використання лише одного накопичувального (C_H) конденсатора замість конденсаторної комірки та наявність перетворювача напруга–струм (ПНС) у колі зворотного зв'язку.

Вихідний код ЛАЦП з імпульсним від'ємним зворотним зв'язком дорівнює

$$N = \frac{1}{\log \xi} \log \frac{U_{BX}}{U_0}. \quad (16)$$

Визначимо основу логарифма (ξ) і значення коефіцієнта перетворення (Y) перетворювача напруга–струм ПНС, розглядаючи процес перетворення.

У першому такті вихідний струм ПНС підводиться до накопичувального конденсатора C_H і розряджає його. Напруга на C_H зменшується і відповідно зменшується значення вихідного струму ПНС.

Використавши середнє значення вихідного струму ПНС, визначимо напругу на накопичувальному конденсаторі C_H після закінчення першого такту:

$$U_1 = U_0 - \frac{Yt}{2C} \cdot (U_1 + U_0) \quad \text{або} \quad U_1 = \xi U_0, \quad (17)$$

де U_0 – початкове значення напруги на накопичувальному конденсаторі C_H ; t – тривалість часу розряджання, протягом якого вихід ПНС підімкнений до накопичувального конденсатора C_H ; C – ємність накопичувального конденсатора.

Із виразів (1) і (17) знаходимо основу логарифма ЛАЦП з ІЗЗ:

$$\xi = \frac{1 - Yt/2C}{1 + Yt/2C}. \quad (18)$$

Перетворивши вираз (18), отримаємо коефіцієнт перетворення ПНС як

$$Y = \frac{1 - \xi}{1 + \xi} \cdot \frac{2C}{t}. \quad (19)$$

З виразу (18) видно, що основа логарифма ξ залежить від коефіцієнта перетворення ПНС, часу розряджання та ємності накопичувального конденсатора. Отже, відносну похибку перетворення можна визначити за виразом (18) як подвоєну суму відносних похибок перемножуваних параметрів, оскільки добуток в чисельнику та знаменнику мають однакове абсолютне значення і різні знаки:

$$\delta_\xi = 2(\delta_Y + \delta_t + \delta_C). \quad (20)$$

Як видно з останньої формули, для підвищення точності ЛАЦП з імпульсним зворотним зв'язком необхідно стабілізувати параметри компонентів, що визначають основу логарифма, а саме ПНС, накопичувального конденсатора C_H і генератора, що задає час розряду t .

Рекурентні ЛАЦП (рис. 8). Розглянемо суть логарифмічного аналого-цифрового перетворення за рекурентним методом [10, 11]: діленням опорної напруги (U_0) створюємо ряд еталонних рівнів $U_1 - U_n$, з яких будь-які два сусідні відрізняються в ζ разів (де ζ – основа логарифма), причому кількість еталонних напруг менша від кількості розрядів вихідного коду ЛАЦП (n):

$$U_1 = \zeta^{n-1} U_0; U_2 = \zeta^{n-2} U_0; \dots U_{n-1} = \zeta^2 U_0 \text{ і } U_n = \zeta U_0. \quad (21)$$

Почергово порівнюємо добуток еталонних напруг (починаючи з першої) із вхідною напругою. Запам'ятовуємо значення еталонної напруги, за якої відбувся перехід через рівень вхідної напруги і надалі використовуємо його як опорну напругу. Задаємо, що значення розрядів вихідного коду дорівнюють результатам порівняння вхідної напруги з відповідними добутками еталонних напруг.

Значення напруги в останньому вузлі дільника U'_n дорівнюватиме добутковій опорної напруги U_0 і вагових коефіцієнтів тих вузлів, у разі підключення яких до компаратора виникало перевищення рівня вхідного сигналу:

$$U'_n = U_0 * \prod_{i=1}^{i=n} \zeta^{A_i \cdot (n-i+1)}, \quad (22)$$

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

Отже, на момент закінчення перетворення компенсаційний сигнал U'_n дорівнює вхідному ($U'_n = U_{ВХ}$) із похибкою, що не перевищує значення $\delta = \frac{1-\zeta}{\zeta} \cdot 100\%$.

Результат перетворення дорівнює кодові (N)

$$N = \sum_{i=1}^n A_i \cdot (n-i+1) \quad (23)$$

і пропорційний до логарифма відношення вхідного сигналу до опорного.

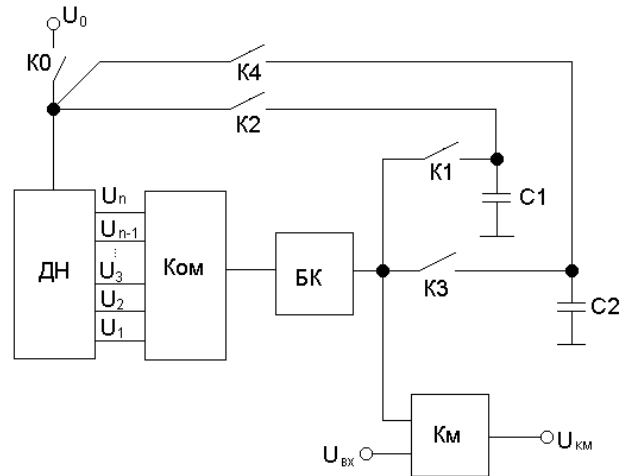


Рис. 8. Спрощена функціональна схема рекурентного ЛАЦП

Паралельні ЛАЦП (рис. 9). Найбільш швидкодіючими є паралельні АЦП. Фактично всі паралельні АЦП сьогодення є лінійними. Однією з найбільших проблем під час розроблення паралельних АЦП є створення сітки заданих рівнів, кількість яких для n-розрядного вихідного коду повинна становити $2^n - 1$; у разі перетворення напруги на код для забезпечення такої сітки необхідно $2^n - 1$ еталонних напруг. Зауважимо, що крок квантування повинен мати сталі значення $\Delta_K = \frac{U_{ВХН}}{2^n - 1}$ (де $U_{ВХН}$ – номінальне значення вхідної напруги), тобто два сусідні рівні відрізняються на те саме значення (Δ_K).

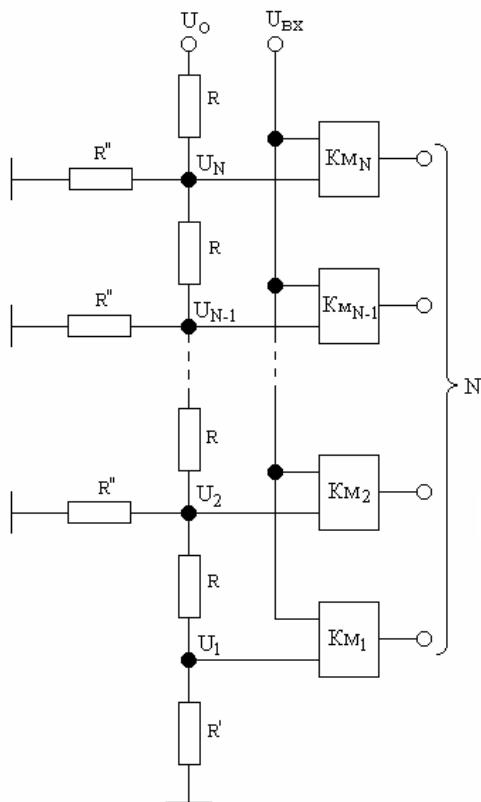


Рис. 9. Спрощена функціональна схема паралельного ЛАЦП

дільник з різними значеннями опорів нетехнологічний через виникнення значних похибок еталонних напруг, внаслідок відхилення опорів резисторів дільника від номінального значення за інтегрального виготовлення перетворювача.

Пропонуємо [12, 13] вирішити проблему побудовою дільника напруги з однакових структурних блоків. Цей дільник забезпечує потрібні значення еталонних напруг. Для цього опорна напруга U_0 підводиться до дільника напруги, у вузлах якого формуються еталонні напруги $U_1 - U_n$. Кількість еталонних напруг дорівнює кількості розрядів (n) ЛАЦП, причому:

$$U_1 = \zeta^n U_0; U_2 = \zeta^{n-1} U_0; U_3 = \zeta^{n-2} U_0; \dots; U_{n-1} = \zeta^2 U_0 \quad \text{і} \quad U_n = \zeta U_0. \quad (24)$$

Оскільки еквівалентний опір між будь-яким вузлом дільника напруги і спільною шиною дорівнює одному і тому ж значенню R' , то відношення будь-яких сусідніх рівнів опорних напруг дорівнюватимуть основі логарифма:

$$\frac{U_{i-1}}{U_i} = \zeta.$$

З появою та розвитком інтегральної мікроелектроніки проблеми створення лінійних паралельних АЦП, пов'язані з дільником напруги та значною кількістю компараторів в одній мікросхемі, були розв'язані й уже реалізовані інтегральні паралельні АЦП на 6–8 двійкових розрядів.

Дільник напруг у лінійних АЦП виконаний у вигляді послідовно з'єднаних резисторів одного номіналу, тому є високотехнологічним з погляду інтегрального виготовлення, оскільки в інтегральній схемі відхилення однотипних елементів у процентному співвідношенні є однаковими і похибки еталонних напруг від відхилення опорів резисторів дільника від номінального значення, викликаного інтегральним виконанням дільника, не виникає (звичайно, за умови, що всі резистори дільника виготовлені на одній підкладці).

Для побудови паралельних логарифмічних АЦП такий дільник не придатний, оскільки крок квантування в логарифмічних АЦП є змінним і два сусідні рівні (еталонні напруги) повинні відрізнятися у ζ разів (де ζ – основа логарифма), тобто два сусідні резистори дільника повинні відрізнятися у ζ разів. А

Отже, будуючи дільник напруги на однакових Г-подібних резисторних ланках $R - R''$ і вводячи допоміжний резистор R' , можемо забезпечити необхідну кількість рівнів опорних напруг лише трьома значеннями опорів, а саме:

$$R, R' = \frac{\zeta}{1-\zeta} R \quad \text{і} \quad R'' = \frac{\zeta}{(1-\zeta)^2} R. \quad (25)$$

Висновки

На основі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Традиційні способи побудови ЛАЦП і КЛАЦП на основі р-п-переходу напівпровідникового діода чи транзистора, розрядного RC-кола, інтегратора чи резисторних матриць типу $R - 2R$ дають змогу реалізувати лише натуральну або двійкову основу логарифма.

2. У ЛАЦП на комутованих конденсаторах на пасивних і активних конденсаторних комірках, з імпульсним зворотним зв'язком і рекурентних, а також у паралельних ЛАЦП на резисторних матрицях типу $R - R' - R''$ можна реалізувати будь-яке значення основи логарифма.

3. Забезпечення під час процесу аналого-цифрового перетворення різних значень основи логарифма істотно розширяє функціональні можливості як самих ЛАЦП, так і пристроїв, реалізованих з їх використанням.

1. Cantarano S., Pallotino G. *Logarithmic Analog-to-Digital Converters: A Survey*. "IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement", Vol. IM 22, № 3, September, 1973, P. 201–213.
2. J. Sit. *A Micropower Logarithmic A/D with Offset and Temperature Compensation* / J. Sit and R. Sarpeshkar // IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 39, 2004, nr. 2, P. 308–319.
3. *Les convertisseurs logarithmiques pour les signaux a large plage de variations* / Jean-Paul Andreotti // *Electronique Industrielle. Paris.* – 1985, № 96, November, P. 65–72.
4. 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, P. 2755–2765.
5. 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.
6. А.с. 547785 СССР. *Логарифмический аналого-цифровой преобразователь* / В. А. Тесленко, В. Д. Циделко // Бюл.7, 1977.
7. Мычуда З. Р., Дудыкевич В. Б. *Способ определения логарифма: А. с. 819948 СССР.* – 1982, Б.И. 29.
8. Мычуда З. Р. *Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі – АЦП майбутнього.* – Львів: Простір, 2002. – 242 с.
9. Мычуда З. Р., Яворский Н. В. *Логарифмический аналого-цифровой преобразователь: А.с. 1501097 СССР.* – 1989, Б. И. 30.
10. Мычуда З. Р., Ільканич К. І., Мычуда Л. З. *Логарифмічне аналого-цифрове перетворення за рекурентним методом* // Матеріали МНТК "Приладобудування-2004", Вінниця–Ялта, 2004. – С. 68–71.
11. Патент 113138 Україна. *Логарифмічний аналого-цифровий перетворювач* / Мычуда Л. З., 2016, Бюл. № 23.
12. Патент 80691 Україна. *Паралельний аналого-цифровий перетворювач* // Мычуда З. Р., Куземко О. З., Коструба О. Р., 2007, Бюл. № 17.
13. Мычуда З. Р., Мычуда Л. З., Коструба О. Р. *Паралельний логарифмічний аналого-цифровий перетворювач* // Тези міжнародної НТК "Датчики, прилади та системи – 2008", Черкаси–Гурзуф, 2008. – С. 89–91.