

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

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕКУРЕНТНИХ ЛОГАРИФМІЧНИХ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

<https://doi.org/10.23939/amm2020.01.009>

Ó Мичуда З. Р., Мичуда Л. З., Єліссєва Г. С., 2020

Досліджено параметри рекурентних логарифмічних АЦП. Встановлено взаємну залежність між значенням основи логарифму, точністю та швидкодією.

Ключові слова: логарифмічні АЦП, параметри, вибір, основа, точність, швидкодія.

Dependence of recurrent logarithmic ADCs parameters. The interdependence between the value of the base of logarithm, accuracy and speed is established.

Key words: logarithmic ADCs, parameters, choice, basis, accuracy, speed.

Вступ

У сучасних комп’ютеризованих системах найрізноманітнішого призначення використовується величезна кількість сенсорів. Переважна більшість сенсорів має аналоговий вихідний сигнал, що змушує проводити їх аналого-цифрове перетворення для забезпечення подальшого оброблення в системах. Якість систем у першу чергу залежить від точності та швидкодії застосованих у них аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). У загальному, АЦП поділяються на лінійні та логарифмічні. До недавня лінійні АЦП переважали логарифмічні за точністю та швидкодією, що зумовило їх переважне застосування. Проте останнім часом прогрес у техніці логарифмічного перетворення призвів до того, що основні метрологічні характеристики логарифмічних АЦП (ЛАЦП) зрівнялися з відповідними характеристиками лінійних АЦП. І тепер ЛАЦП викликають підвищену цікавість розробників, оскільки поряд з аналого-цифровим перетворенням ЛАЦП забезпечують додаткові можливості, серед яких найбільш вагомими – широкий динамічний діапазон вхідних сигналів і можливість оброблення сигналів у логарифмічній арифметиці. Останнє дає змогу набагато прискорити швидкодію систем, оскільки довготривалі операції лінійної арифметики (множення, ділення) у логарифмічній зводяться до швидких операцій (додавання, віднімання) і це особливо важливе для систем реального часу, в яких час оброблення інформації має бути якнайменшим.

Найвищі метрологічні характеристики забезпечують ЛАЦП на комутованих конденсаторах, які вперше були створені на кафедрі комп’ютеризованих систем автоматики Національного університету «Львівська політехніка».

ЛАЦП на комутованих конденсаторах реалізують як із сталою, так і зі змінною в процесі перетворення основою логарифму. За алгоритмом перетворення ці ЛАЦП є послідовними, порозрядними, паралельними, з імпульсним зворотним зв’язком і рекурентні. Серед цих ЛАЦП найменше вивчені рекурентні – недостатньо досліджено вплив основи логарифму на метрологічні параметри перетворювачів, що спричиняє значні труднощі при проектуванні та практичній реалізації рекурентних ЛАЦП.

Аналіз літературних джерел

Використання рекурентних алгоритмів у багатьох технічних пристроях і системах дає змогу підвищити точність оброблення інформації та сприяє покращенню швидкодії. У цьому плані цікавими є відомі практичні реалізації різних перетворювачів аналогових сигналів.

Рекурентний метод логарифмічного аналого-цифрового перетворення було запропоновано в роботі [1].

У патенті [2] для підвищення швидкодії запропоновано метод аналого-цифрового перетворення з використанням нейронної мережі, що працює за рекурентним алгоритмом.

У [3] розглянуто побудову аналого-цифрових багатофункціональних перетворювачів на комутованих конденсаторах, принцип дії яких базується на перерозподілі заряду, а рекурентні алгоритми використовуються для відтворення степеневих рядів.

Рекурентний алгоритм покладено в основу дії нейронного декодера зміщення нуля аналого-цифрового перетворювача [4].

У роботі [5] було застосовано рекурентні алгоритми для спрощення обчислень параметрів перехідних процесів і розроблення методів визначення квазіусталеного режиму роботи перетворювачів.

У [6] розроблено модель первинного вимірювального перетворювача на основі нейронної мережі, в якій за рахунок рекурентного алгоритму було підвищено точність.

У патенті [7] внаслідок використання рекурентного методу перетворення підвищено точність і швидкодію логарифмічного АЦП.

На основі рекурентних алгоритмів у роботі [8] виведено формули для розрахунку параметрів лінійних імпульсно-індукційних електромеханічних перетворювачів.

У патенті [9] запропоновано підвищення точності та спрощення реалізації логарифмічного АЦП за рахунок використання рекурентного алгоритму роботи.

Мета роботи

Метою даної роботи є дослідження впливу основи логарифму на параметри рекурентних ЛАЦП для спрощення проектування та практичної реалізації ЛАЦП із заданими параметрами.

Виклад основного матеріалу

Реалізація рекурентних ЛАЦП суттєво залежить від способу відтворення багатоканальної міри, що забезпечує створення потрібної кількості еталонних (зразкових) величин, як правило, - напруг, значення яких визначаються як основою логарифма. У свою чергу основа логарифму в процесі перетворення може мати як постійне [10], так і змінне [11] значення.

Рекурентні ЛАЦП із сталою основою логарифму. У них сутність логарифмічного аналого-цифрового перетворення зводиться до наступного. Багатоканальна міра напруги діленням опорної напруги (U_0) відтворює низку еталонних рівнів напруг U_1-U_n , з яких будь-які два сусідні відрізняються в Z разів (тут Z - основа логарифму):

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

Із вхідною напругою порівнюється по черговою кожна з еталонних напруг, починаючи з першої. При цьому запам'ятовується рівень еталонної напруги, при якому відбувся перехід через рівень вхідної напруги і в подальшому він використовується як нова опорна напруга. Таким чином напруга в останньому вузлі дільника U_k , тобто компенсаційний сигнал, дорівнюватиме добутковій опорної напруги U_0 і вагових коефіцієнтів тих вузлів, при підключенні яких до компаратора було перевищення рівня вхідного сигналу:

$$U_k = U_o \times \prod_{i=1}^{i=n} z^{a_i \times (n-i+1)}, \quad (2)$$

де a_i - коефіцієнт, що приймає в кожному i -такті перетворення значення 1 або 0 відповідно до стану компаратора 1 або 0.

На момент закінчення перетворення компенсаційний сигнал рівний вхідному ($U_k = U_{вх}$) з похибкою не перевищує значення

$$d = \frac{1-z}{z} \times 100\% . \quad (3)$$

Значення вихідного коду (N) визначається результатами порівняння вхідної напруги з відповідними еталонними напругами згідно формули

$$N = \sum_{i=1}^n a_i \times (n-i+1) \quad (4)$$

i є пропорційним логарифму відношення вхідного сигналу до опорного.

Час перетворення рекурентного ЛАЦП

$$t_{п} \approx nT_T, \quad (5)$$

де t_p - час перетворення, T_T - період повторення тактових імпульсів.

Визначимо кількість еталонних напруг (n), що необхідна для рекурентного аналого-цифрового перетворення зі сталою основою логарифму. Із розгляду закону зміни показників степеня еталонних напруг. Як видно із (1) ці показники змінюються від 1 до n з одиничним приростом, причому вихідний код N рекурентного ЛАЦП є сумою цих показників степеня. Отже, код N є сумою арифметичної прогресії і тому може бути поданий згідно загально відомої формули для цієї суми:

$$N = \frac{2a_1 + d(n-1)}{2} \times n, \quad (6)$$

де a_1 – перший член прогресії; d – різниця прогресії; n - кількість перших членів прогресії (вона ж бо є кількістю еталонних напруг згідно (1)).

Враховуючи, що у нашій випадку $a_1=1$ і $d=1$, отримаємо

$$N = \frac{n+1}{2} \times n.$$

Практично у рекурентних ЛАЦП із сталою основою логарифма $n \gg 1$. Тому останній вираз набуває вигляду

$$N \approx \frac{n^2}{2}. \quad (7)$$

Таким чином, кількість еталонних напруг визначиться як

$$n = \sqrt{2N}. \quad (8)$$

У свою чергу вихідний код ЛАЦП визначається за відомою формулою

$$N = \frac{1}{\log z} \times \log \frac{U_{вх}}{U_o}. \quad (9)$$

Задаючи потрібні параметри рекурентного ЛАЦП зі сталою основою логарифма, за вище наведеними формулами можна обчислити необхідну кількість еталонних напруг, похибку та час перетворення. Наприклад, при опорній напрузі 10 В для забезпечення основної похибки перетворення $d=0,1\%$ в діапазоні вхідних напруг 1 мВ – 10 В знаходимо:

- 1) із формули (3) визначаємо основу логарифму $z = 0,999$;

- 2) за виразом (9) обчислюємо номінальне (N_z) значення вихідного коду

$$N_z = 9206;$$
- 3) із (8) знаходимо кількість еталонних напруг $n = 136$;
- 4) час перетворення визначаємо за формулою (5): $t_{\Pi} \approx 136T_T$.

Рекурентні ЛАЦП із змінною основою логарифму. Особливістю цих ЛАЦП є виконання багатоканальної міри напруги, що діленням опорної напруги (U_0) відтворює низку еталонних рівнів напруг U_1-U_n , в яких основа логарифму змінюється за двійковим законом:

$$U_{k_1} = z^{\frac{N_z}{2^1}} U_0; U_{k_2} = z^{\frac{N_z}{2^2}} U_0; U_{k_3} = z^{\frac{N_z}{2^3}} U_0; \dots U_{k_{n-1}} = z^{\frac{N_z}{2^{n-1}}} U_0 \quad \text{і} \quad U_{k_n} = z^{\frac{N_z}{2^n}} U_0. \quad (10)$$

де N_z - номінальне значення вихідного коду логарифмічного перетворювача; $z^{\frac{N_z}{2^i}}$ - змінна основа логарифму, причому $i=1,2,3,\dots,n$.

Процес перетворення у рекурентних ЛАЦП із змінною основою логарифму протікає циклічно: у кожному циклі із вхідною напругою порівнюється компенсаційна напруга, що є добутком відповідних еталонних напруг. На момент закінчення перетворення компенсаційний сигнал рівний вхідному ($U_k = U_{вх}$) і має значення

$$U_k = U_0 \times \prod_{k=1}^m \prod_{i=1}^n z^{a_i \times \frac{N_z}{2^{(k-1)n+i}}} \quad (11)$$

Вихідний код матиме значення

$$N = \prod_{k=1}^m \prod_{i=1}^n a_i \times \frac{N_z}{2^{(k-1)n+i}} \quad (12)$$

де $a_i = 1$ коли результат порівняння компаратора на i -такті в k -циклі є рівний логічній „1”; $a_i = 0$ коли результат порівняння компаратора на i -такті в k -циклі є рівний логічному „0”.

При цьому похибка перетворення не перевищує значення

$$d = \frac{1 - z^{\frac{N_z}{2^n}}}{z^{\frac{N_z}{2^n}}} \times 100\%. \quad (13)$$

Результат перетворення N записується у лічильник (старші розряди) і у регістр (молодші розряди). При цьому лічильник підраховує кількість повних циклів, а регістр фіксує результат перетворення в неповному останньому m -циклі.

Час перетворення рекурентних ЛАЦП із змінною основою логарифма

$$t_{\Pi} = mT_{\Pi}, \quad (14)$$

де m - кількість циклів перетворення, T_{Π} - час одного циклу перетворення:

$$T_{\Pi} = nT_T. \quad (15)$$

Кількість циклів перетворення "m" у запропонованому рекурентному ЛАЦП залежить від того, яку точність ним хочемо забезпечити, і може бути визначена за формулою

$$m = \frac{N}{N_z}, \quad (16)$$

де N - номінальне значення коду бажаної розрядності (r), $N = 2^r$; N_z - номінальне значення коду, що відповідає розрядності (n) багаторозрядної міри.

При перетворенні зі змінною основою логарифма значно підвищується швидкодія рекурентного ЛАЦП. Так при тих же вихідних даних, як для ЛАЦП із сталою основою логарифма, задавши у циклі $n=12$ (при цьому номінальне значення $N_z=4096$), отримаємо для $N=9206$ перетворення за три цикли: два повні цикли ($2N_z=8192$) і один цикл неповний. Таким чином, час перетворення згідно виразу (14) становитиме $t_{\Pi} \approx 36T_T$, тобто не перевищуватиме 36 періодів повторення тактових імпульсів.

Реалізація рекурентного ЛАЦП із змінною основою логарифма. Узагальнена структурна схема такого перетворювача і епюри напруг, що ілюструють його роботу, наведені відповідно на рис.1 і рис.2. Узагальнена структурна схема рис.1 містить БК – блок керування, ГТІ - генератор тактових імпульсів, Км - компаратор, Л – лічильник результату, РР - реєстр результату, БФПФ - блок формування показникової функції, що включає БМ – багатоканальна міра, Ком – комутатор, ЕП1 і ЕП2 – перший і другий елементи пам'яті, П1 і П2 – перший і другий перемикачі, ЕЗ – елемент збігу, Т – тригер, К - аналоговий ключ. На рисунку позначено: U_0 - опорна напруга, $U_{ВХ}$ - вхідна напруга, F_T - тактова частота, N_1 і N_2 – відповідно старші та молодші розряди вихідного коду, $U_{k1} - U_{kn}$ - компенсаційні напруги, $K_1 - K_n$ - коефіцієнти передачі багатоканальної міри по виходах 1 - n; F_T – тактова частота; А, В, С і ПУСК – керуючі сигнали.

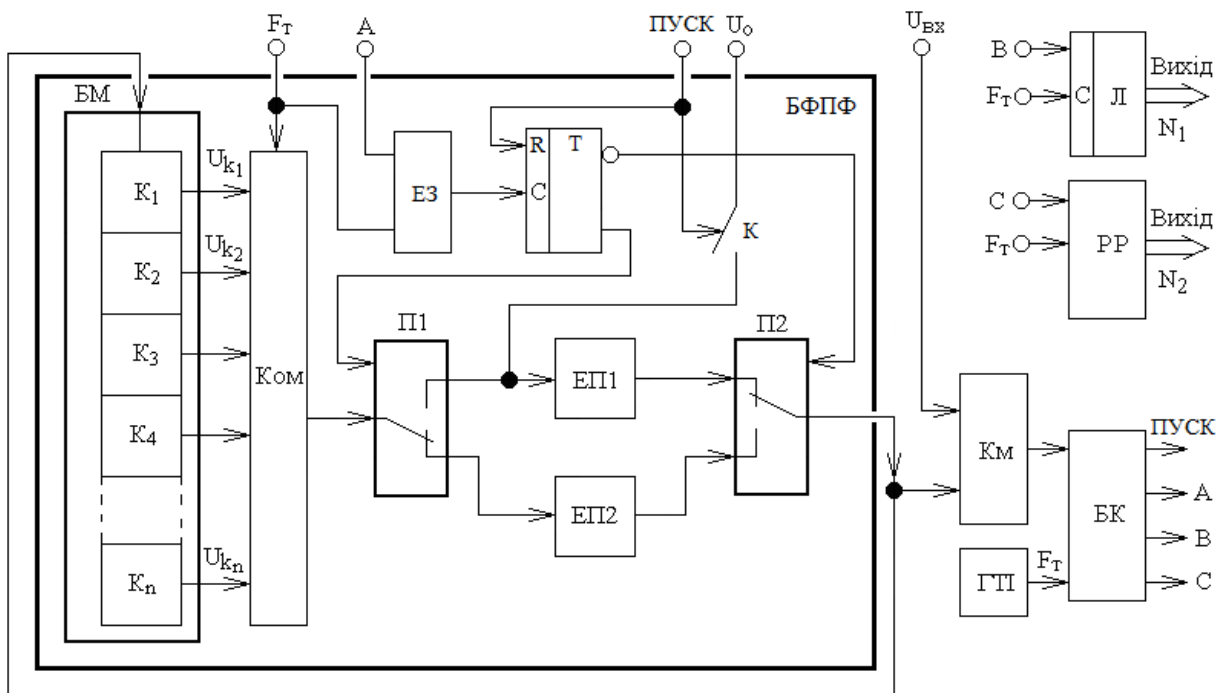


Рис.1. Узагальнена структурна схема рекурентного ЛАЦП із змінною основою логарифма

Практично доцільно: 1) в якості реєстра результату РР використати стандартний реєстр послідовних наближень; 2) багатоканальну міру напруги виконати на основі регульованого масштабного перетворювача з цифровим перемиканням коефіцієнтів передачі напруги; 3) як елементи пам'яті ЕП1 і ЕП2 використати конденсатори.

Вихід БФПФ об'єднаний з виходом перемикача П2 і входом компаратора Км, а вихід комутатора Ком об'єднаний із входом перемикача П1. Інформаційні входи перемикачів П1 і П2 перемикаються протифазно, оскільки входи управління П1 і П2 підключені відповідно до прямого та інверсного виходів тригера Т, який перемикається тактовими імпульсами, що поступають через елемент збігу ЕЗ.

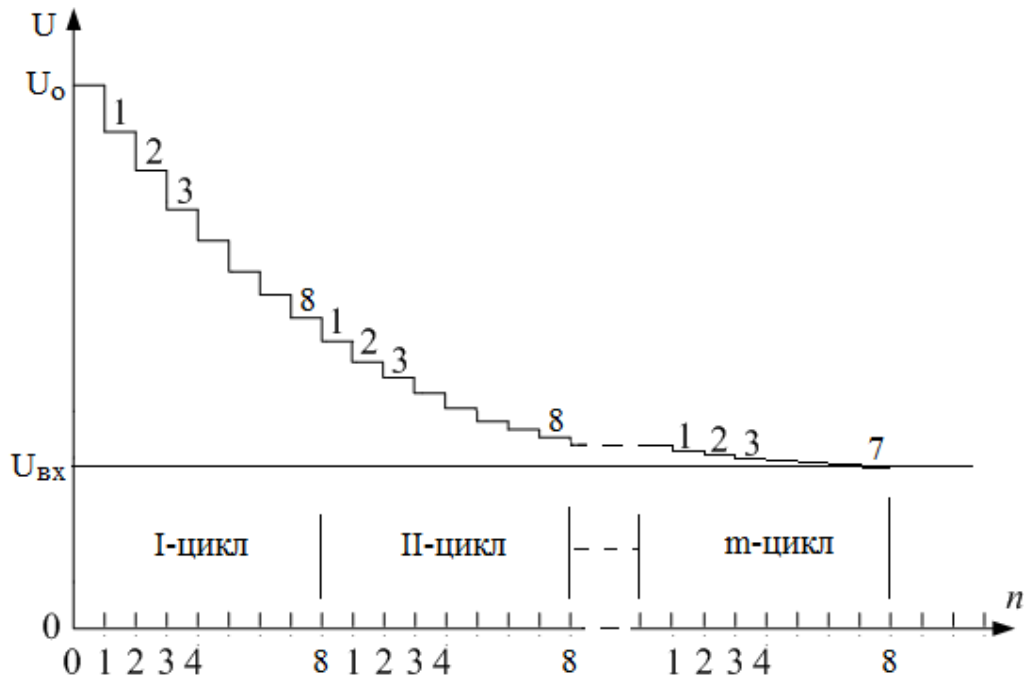


Рис.2. Епюри напруг рекурентного ЛАЦП із змінною основою логарифма

Розглянемо роботу запропонованого рекурентного ЛАЦП із змінною основою логарифма.

Сигналом "Пуск" ЛАЦП устанавлюється у початковий стан: обнулюються лічильник Л, регістр РР і тригер Т1, а також – вмикається ключ К і на елемент пам'яті ЕП1 записується значення опорної напруги U_0 .

Логічна "1" з інверсного виходу тригера Т вмикає П2 у верхн положення, в результаті чого напруга з ЕП1 передається на вхід багатоканальної міри БМ, з першого виходу якої через аналоговий комутатор Ком і перший перемикач П1 записується у ЕП2. Напруга на виході ЕП2 буде рівною

$$U_{k_1} = U_0 z^{\frac{N_H}{2^k}}$$

У загальному випадку напруга на виході блоку формування показникової функції (U_k) порівнюється компаратором Км із вхідним сигналом $U_{ВХ}$; у тому випадку коли $U_k \geq U_{ВХ}$ на виході компаратора Км є рівень логічної "1", а коли $U_k < U_{ВХ}$ - на виході компаратора логічний "0".

Після закінчення імпульса ПУСК починається перетворення по циклах, такт за тактом. Кожному k-циклу ($k=1,2,3\dots m$) відповідає n тактів. Кожному такту відповідає один імпульс генератора тактових імпульсів ГТІ.

Компаратор Км порівнює компенсаційну напругу з виходу БФПФ з вхідним сигналом. Якщо на виході компаратора Км була логічна "1", то блок керування БК видає сигнал А, яким відкривається елемент збігу ЕЗ і тактовий імпульс проходить через ЕЗ і перемикає тригер Т.

У випадку логічного "0" на виході компаратора Км блок керування БК забороняє сигнал А. Тому на виході елемента збігу ЕЗ також буде логічний "0", в результаті чого тригер Т не перемикається і перемикачі П1 і П2 залишаються в попередньому стані.

1. Перший цикл перетворення.

Після початкової устанавки напруга на виході БФПФ (вона ж бо вихідна напруга ЕП1) рівна опорній напрузі. Тому БК виробляє сигнал А і перший імпульс генератора тактових імпульсів (після закінчення імпульса ПУСК) перемикає комутатор Ком на другий вихід багатоканальної міри

БМ, проходить через елемент збігу ЕЗ, перекидає тригер Т, сигнали із виходів якого перемикають П1 і П2, в результаті чого вхід ЕП1 підключається до виходу Ком, а вихід ЕП2 підключається до виходу БФПФ.

Компаратор Км порівнює компенсаційну напругу з виходу БФПФ $U_{k_1} = U_0 z^{\frac{N_H}{2^1}}$ з вхідним сигналом $U_{вх}$. Цей результат порівняння записується у регістрі результату РР.

Отже, у першому такті перетворення напруга на елементі пам'яті ЕП2

$$U_{k_1} = U_0 z^{\frac{N_H}{2^1}},$$

а напруга на ЕП1 установлюється рівною

$$U_{k_2} = U_0 z^{\frac{N_z}{2^1}} z^{\frac{N_z}{2^2}}.$$

У другому такті перетворення (другий імпульс ГТІ) вище описаний процес повторюється. Напруга U_{k_2} порівнюється компаратором Км з вхідним сигналом $U_{вх}$. Якщо результат порівняння в другому такті логічна "1", то вона буде записана в наступний біт регістру РПН та перемкнеться тригер Т. В результаті чого до входу БМ буде під'єднаний через П2 перший елемент пам'яті ЕП1, на якому напруга буде рівною

$$U_{k_2} = U_0 z^{\frac{N_z}{2^1}} z^{\frac{N_z}{2^2}},$$

а напруга на другому елементі пам'яті ЕП2, підключеному через П1 до третього виходу БМ установлюється рівною

$$U_{k_3} = U_0 z^{\frac{N_z}{2^1}} z^{\frac{N_z}{2^2}} z^{\frac{N_z}{2^3}}.$$

Далі наступає третій такт і т.д.

В останньому n-такті першого циклу напруга на виході блоку формування показникової функції установлюється рівною

$$U_{k_n} = U_0 z^{\frac{N_z}{2^1}} z^{\frac{N_z}{2^2}} z^{\frac{N_z}{2^3}} \times \dots \times z^{\frac{N_z}{2^n}}.$$

Після дії n-ного імпульса ГТІ у першому циклі перетворення блок керування БК запише у лічильник результату Л одиницю та установлює в початковий стан комутатор Ком і тригер Т.

2. Другий цикл перетворення.

Другий цикл перетворення починається n+1 імпульсом ГТІ і аналогічний першому циклу.

В останньому такті другого циклу напруга на виході блоку формування показникової функції установлюється рівною

$$U_{2n+1} = U_0 z^{\frac{N_z}{2^1}} z^{\frac{N_z}{2^2}} z^{\frac{N_z}{2^3}} \times \dots \times z^{\frac{N_z}{2^n}} z^{\frac{N_z}{2^{n+1}}} z^{\frac{N_z}{2^{n+2}}} z^{\frac{N_z}{2^{n+3}}} \times \dots \times z^{\frac{N_z}{2^{2n}}}.$$

Після закінчення останнього (2n) імпульса ГТІ на другому циклі спадним фронтом вихідного сигналу елемента збігу ЕЗ2 перемикається лічильник Л у нуль і вмикає перший вхід регульованого масштабного підсилювача РМП та імпульсом переповнення лічильника Л перемикається лічильник результату ЛР, реєструючи "2" цикли перетворення.

Робота на інших циклах перетворення відбувається аналогічно.

М. Останній m-цикл перетворення.

В останньому такті m-циклу напруга на виході блоку формування показникової функції установлюється рівною

$$U_{mn+1} = U_0 z^{\frac{N_z}{2^1}} z^{\frac{N_z}{2^2}} z^{\frac{N_z}{2^3}} \times \dots \times z^{\frac{N_z}{2^n}} z^{\frac{N_z}{2^{n+1}}} z^{\frac{N_z}{2^{n+2}}} z^{\frac{N_z}{2^{n+3}}} \times \dots \times z^{\frac{N_z}{2^{2n}}} \times \dots \times z^{\frac{N_z}{2^{(m-1)n+1}}} z^{\frac{N_z}{2^{(m-1)n+2}}} z^{\frac{N_z}{2^{(m-1)n+3}}} \times \dots \times z^{\frac{N_z}{2^{mn}}}$$

або

$$U_k = U_0 \times \prod_{k=1}^m \prod_{i=1}^n z^{a_i \times \frac{N_z}{2^{(k-1)n+i}}} \quad (9)$$

Якщо на останньому m -циклі перетворення в якомусь такті, наприклад, $(m-1)n+2$ результат порівняння компаратором Км був рівний нулю, то у відповідному розряді вихідного коду регістра РПН буде записано нуль, а у вихідній напрузі блоку формування показникової функції буде

відсутня складова напруги $z^{\frac{N_z}{2^{(m-1)n+2}}}$, що відповідає тому розряду:

$$U_{mn+1} = U_0 z^{\frac{N_z}{2^1}} z^{\frac{N_z}{2^2}} z^{\frac{N_z}{2^3}} \times \dots \times z^{\frac{N_z}{2^n}} z^{\frac{N_z}{2^{n+1}}} z^{\frac{N_z}{2^{n+2}}} z^{\frac{N_z}{2^{n+3}}} \times \dots \times z^{\frac{N_z}{2^{2n}}} \times \dots \times z^{\frac{N_z}{2^{(m-1)n+1}}} z^{\frac{N_z}{2^{(m-1)n+3}}} \times \dots \times z^{\frac{N_z}{2^{mn}}}$$

Останнім $m > n$ - імпульсом ГТІ результат порівняння з виходу компаратора Км записується у регістр результату РР. Таким чином у лічильнику та регістрі результату буде записано відповідно старші ($N_{ст.р.}$) та молодші ($N_{м.р.}$) розряди вихідного коду. Вихідний код рекурентного ЛАЦП із змінною основою логарифму матиме значення

$$N = N_{ст.р.} + N_{м.р.} = \overset{m}{\underset{k=1}{\overset{\circ}{a}}} \overset{n}{\underset{i=1}{\overset{\circ}{a}}} a_i \times \frac{N_z}{2^{(k-1)n+i}}, \quad (17)$$

де $a_i = 1$ коли результат порівняння компаратора на i -такті в k -циклі є рівний логічній „1”;

$a_i = 0$ коли результат порівняння компаратора на i -такті в k -циклі є рівний логічному „0”.

Перша поява першої логічної одиниці на виході компаратора записується у регістр результату РР і є свідченням того, що цей цикл є останнім.

Після закінчення останнього $m > n$ - імпульса генератора тактових імпульсів на останньому m -циклі блок керування реєструє у лічильнику результату Л „ $m-1$ ” циклів перетворення, а у регістрі результату РР значення коду на останньому m -циклі перетворення. І це є закінченням перетворення.

Перевагою запропонованого нами рекурентного логарифмічного аналого-цифрового перетворення із змінною основою логарифму є те, що бажана точність забезпечується меншою кількістю зразкових величин, що призводить до підвищення швидкодії, спрощення реалізації та зниження ціни перетворювача.

Так при 8-ми розрядному рекурентному ЛАЦП (рис.1) отримаємо результат перетворення для точності 8 дв.р. за 1 цикл при часі перетворення $8T_T$, а для точності 10 дв.р. за 4 цикли при часі перетворення $32T_T$.

Висновки

Проведені нами дослідження показують:

1. Рекурентні ЛАЦП із змінною основою логарифму порівняно з рекурентними ЛАЦП із сталою основою потребують значно менше еталонних величин і мають значно більшу швидкодію.

2. Рекурентні ЛАЦП із змінною основою логарифму дають змогу отримати результат перетворення більшої від своєї розрядності точності на 2-4 двійкові розряди.

3. При збільшенні точності рекурентних ЛАЦП із змінною основою логарифму (відносно їх розрядності) зростає час перетворення, тому підвищення точності більш ніж на 2 – 4 двійкові розряди недоцільне.

Список літератури

1. Мичуда З.Р. , Ільканич К.І., Мичуда Л.З. Новий метод логарифмічного аналого-цифрового перетворення// Збірник наукових праць “Комп’ютерні технології друкарства”, 2004, № 12, с.220-224.
2. Brian Watson. Analog to Digital Conversion Using Recurrent Neural Networks.[Text] Patent USA, no. US007345604B2, 2008.
3. Мичуда Л.З. Функціональні перетворювачі рекурентного типу на комутованих конденсаторах для систем енергообліку. [Текст] / Л.З. Мичуда, З.Р. Мичуда // Вісник НУ «Львівська політехніка»: «Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація.» [зб. наук. праць] – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка» – 2010р. – № 677 – с.98 – 104.
4. Aigerim Tankimanova, Akshay Kumar Maan, Alex Pappachen James. (2017) Level-shifted neural encoded analog-to-digital converter [conference-paper]/ 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS): 5-8 December 2017, Batumi, Georgia. DOI: 10.1109/icecs.2017.8292026.
5. Ромашко В.Я. Аналіз режимів роботи перетворювачів електричної енергії методом функцій вільного режиму: Дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. — Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, 2010. Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/806>
6. О.В. Полярус. Динамічна нейромережева модель первинного перетворювача. [Текст] / О.В. Полярус, А.О Подорожняк, А.О. Коваль // ISSN 2079-0031 Вестник НТУ "ХПИ". – 2014. – № 35 (1078) – с. 152 – 160.
7. Патент 113138 Україна. Логарифмічний аналого-цифровий перетворювач/ Мичуда Л.З., 2016, Бюл. №23.
8. В.Ф. Болюх. Исследование линейного импульсно-индукционного электромеханического преобразователя при различных схемах питания индуктора [Текст] / В.Ф. Болюх, А.И. Кочерга, И.С. Щукин // ISSN 2074-272X. Електротехніка і Електромеханіка. – 2018. – №1– с.21 – 28. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.1.03.
9. Patent 232384 Polska. Logarytmiczny przetwornik analogowo-cyfrowy/ Myszuda Z., 2019, WUP 06/19.
10. Антонів У.С. Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі з накопиченням заряду: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 "Комп’ютерні системи та компоненти" / Антонів Уляна Степанівна; МОН України, Національний ун-т "Львівська політехніка". – Львів, 2013. – 20 с.
11. Мичуда З.Р., Мичуда Л.З., Католик Б.О. Логарифмічне аналого-цифрове перетворення зі зміною основи логарифму / Сборник трудов международной научно-технической конференции "Приборостроение -2004", Винница-Ялта, 2004. - с. 63-67.

Reference

1. Mychuda Z.R., Ilkanych K.I., Mychuda L.Z. Novyi metod loharyfmichnoho analoho-tyyfrovoho peretvorennya // Zbirnyk naukovykh prats “Komp’iuterni tekhnolohii drukarstva”, 2004, № 12, s. 220 - 224.
2. Brian Watson. Analog to Digital Conversion Using Recurrent Neural Networks.[Text] Patent USA, no. US007345604B2, 2008.
3. Mychuda L.Z. Funktsionalni peretvoriuvachi rekurentnoho typu na komutovanykh kondensatorakh dlia system enerhoobliku. [Tekst] / L.Z. Mychuda, Z.R. Mychuda // Visnyk NU "Lvivska politekhnika": "Teploenerhetyka. Inzheneriia dovkillia. Avtomatyziatsiia" [zb. nauk. prats] - Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika" - 2010 r. - № 677 - s. 98 - 104.
4. Aigerim Tankimanova, Akshay Kumar Maan, Alex Pappachen James. (2017) Level-shifted neural encoded analog-to-digital converter [conference-paper]/ 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS): 5-8 December 2017, Batumi, Georgia. DOI: 10.1109/icecs.2017.8292026.
[10.1109/icecs.2017.8292026](https://doi.org/10.1109/icecs.2017.8292026)
5. Romashko V.Ya. Analiz rezhymiv roboty peretvoriuvachiv elektrychnoi enerhii metodom funktsii vilnoho rezhymu: Dys. na zdobuttia nauk. stupenia doktora tekhn. nauk za spetsialnistiu 05.09.12 – napivprovodnykovi peretvoriuvachi elektroenerhii. — Natsionalnyi tekhnichniy universytet Ukrainy «Kyivskiy politekhnichniy instytut», Kyiv, 2010. Rezhym dostupu: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/806>

6. O.V. Poliarus. *Dynamichna neiromerezheva model pervynnoho peretvoriuvacha*. [Tekst] / O.V. Poliarus, A.O. Podorozhniak, A.O. Koval // ISSN 2079-0031 *Vestnik NTU "KhPI"*. - 2014. - № 35 (1078) - s. 152 - 160.
7. Patent 113138 Ukraina. *Loharyfmichnyi analoho-tsyfrovyy peretvoriuvach* / Myczuda L.Z., 2016, Biul. №23.
8. V.F. Bolyuh. *Issledovanie lineynogo impulsno-induktsionnogo elektromehaničeskogo preobrazovatelya pri razlichnyih shemah pitaniya induktora* [Tekst] / V.F. Bolyuh, A.I. Kocherga, I.S. Sczukin // ISSN 2074-272X. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. - 2018. - №1 - s. 21-28. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.1.03. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.03>
9. Patent 232384 Polska. *Logarytmiczny przetwornik analogowo-cyfrowy* / Myczuda Z., 2019, WUP 06/19.
10. Antoniv U.S. *Loharyfmichni analoho-tsyfrovi peretvoriuvachi z nakopychenniam zariadu: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.05 "Kompiuterni systemy ta komponenty"* / Antoniv Uliana Stepanivna; MON Ukrainy, Natsionalnyi un-t "Lvivska politehnika". – Lviv, 2013. – 20 s.
11. Mychuda Z.R., Mychuda L.Z., Katolyk B.O. *Loharyfmichne analoho-tsyfrove peretvorennia zi zminoiu osnovy loharyfmu* / *Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Priborostroenie - 2004"*, Vinnitsa-Yalta, 2004. - s. 63-67.