

Крім цього, треба зауважити, що вираз (5) для поправки Δ справедливий, лише якщо $b > a$, тому й формула (16) буде справедлива тільки для $b > a$.

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник / Под ред. В.В. Клюева. Кн. 2. – М.: Машиностроение, 1986. – 351 с. 2. Бучма І.М., Репетило Т.М. Електричні моделі дослідних об'єктів при вихорострумовому методі // Автоматика, вимірювання та керування. – 2008. – № 608. – С. 34–41. 3. Мизюк Л.Я. О состоянии и некоторых перспективах развития информационно-измерительных систем для наземных методов индуктивной электро-разведки // Отбор и передача информации. – К: Наукова думка, 1970. – Вып. 26. – С. 92–100. 4. Дорофеев А.Л., Казаманов Ю.Г. Электромагнитная дефектоскопия. – М.: Машиностроение, 1980. – 232 с. 5. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с. 6. Дорофеев А.Л. Вихревые токи. М.: Энергия, 1977. – 72 с. ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 935). 7. Сидоров И.Н., Христинин А.А., Скорняков С.В. Малогабаритные магнитопроводы и сердечники: Справочник. – М.: Радио и связь, 1989. – 384 с.

УДК 681.335 (088.8)

У.С. Антонів¹, З.Р. Мичуда^{1,2}

¹Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра комп'ютеризованих систем автоматизи,
²Політехніка Сьвентокжиска в Кельцах, Польща

ЛОГАРИФМІЧНІ АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З НАКОПИЧЕННЯМ ЗАРЯДУ. ОГЛЯД. ЧАСТИНА 1

© Антонів У.С., Мичуда З.Р., 2009

Подано класифікацію, виконано порівняльний аналіз властивостей та вказано перспективи розвитку АЦП з накопиченням заряду.

The definition of classifications are given, the comparative analysis of properties is conducted and the prospects of development ADC with accumulation of charge.

1. Вступ. Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі (ЛАЦП) значно переважають за своїми технічними можливостями лінійні АЦП і тому викликають підвищену зацікавленість розробників апаратури найрізноманітнішого призначення. Серед різних типів ЛАЦП найвищі техніко-економічні показники забезпечують ЛАЦП на комутованих конденсаторах (КК), зокрема: вищу точність, безпосереднє перетворення аналогового вхідного сигналу на число-імпульсний код, можливість одержати довільну основу логарифма, більшу технологічність у виготовленні.

Переважна більшість ЛАЦП на КК побудована на основі використання явища перерозподілу заряду (ПЗ) і хоч вже розроблено порівняно багато різних ЛАЦП на КК з накопиченням заряду (НЗ), питання систематизації та оцінки можливостей таких ЛАЦП залишаються невирішеними.

Мета цієї роботи – класифікація, порівняльний аналіз властивостей і визначення перспектив розвитку ЛАЦП з накопиченням заряду на КК.

2. Класифікація. Аналого-цифрові перетворювачі з логарифмічною характеристикою перетворення класифікують за такими ознаками, як відносна похибка перетворення, структурна реалі-

зачія, принцип перетворення чи базовий елемент, використана зразкова міра чи спосіб її відтворення, алгоритм роботи [1].

Аналізуючи ЛАЦП з накопиченням заряду на КК, доходимо висновку, що їх доцільно класифікувати за принципом дії, структурною реалізацією та алгоритмом роботи. Класифікація ЛАЦП з накопиченням заряду на КК, виконана за цими критеріями, наведена на рис. 1.

За принципом дії ЛАЦП з накопиченням заряду на КК можна поділити на:

- ЛАЦП із спадною розгорткою;
- ЛАЦП з наростаючою розгорткою.

Спадна розгортка компенсаційної напруги реалізується в ЛАЦП з накопиченням заряду:

- у пасивних конденсаторних комірках;
- в активних конденсаторних комірках;
- з імпульсним зворотним зв'язком.

Наростаюча розгортка компенсаційної напруги відзначається лише в ЛАЦП з накопиченням заряду в активних конденсаторних комірках.

За структурною реалізацією ЛАЦП з накопиченням заряду в пасивних конденсаторних комірках можна поділити на:

- ЛАЦП з паралельними конденсаторними комірками;
- ЛАЦП з послідовними конденсаторними комірками.

Своєю чергою, в ЛАЦП з накопиченням заряду з імпульсним зворотним зв'язком застосовується місцевий зворотний зв'язок, в якому здійснюється проміжне перетворення напруги на струм.



Рис. 1. Класифікація логарифмічних АЦП з накопиченням заряду

Проаналізуємо принципи побудови та властивості різних класів ЛАЦП з накопиченням заряду на КК.

3. Логарифмічні АЦП з накопиченням заряду на пасивних конденсаторних комірках.

ЛАЦП цього типу будуються на паралельних або послідовних конденсаторних комірках і для отримання логарифмічної характеристики перетворення в них необхідно вводити схему віднімання між входом ЛАЦП і компаратором, причому на схему віднімання подається вхідний сигнал і опорна напруга. В таких ЛАЦП реалізується лише спадна розгортка компенсаційної напруги.

3.1. Логарифмічні АЦП з накопиченням заряду на пасивних паралельних конденсаторних комірках. Спрощена схема ЛАЦП з накопиченням заряду на пасивних паралельних конденсаторних комірках наведена на рис. 2, а епюри її напруг – на рис. 3. Схема містить дозуючий C_d і накопичуючий C_n конденсатори, ключі $K_0 - K_2$, компаратор K_m , схему віднімання СВ і буферний каскад БК.

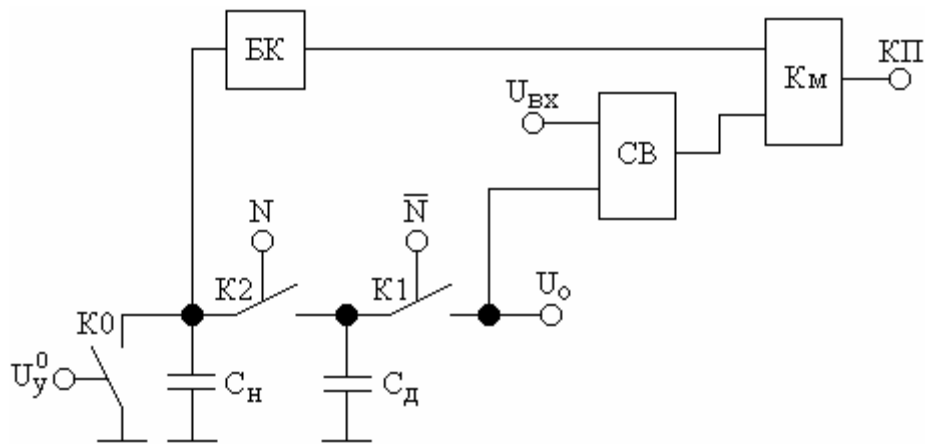


Рис. 2. Спрощена функціональна схема ЛАЦП з накопиченням заряду на пасивній паралельній конденсаторній комірці

Розглянемо роботу схеми (рис. 2).

Перед початком перетворення (і в паузі між тактовими імпульсами) дозуючий конденсатор заряджається через замкнутий ключ K_1 до рівня опорної напруги U_0 , а накопичуючий конденсатор розряджається через ключ K_0 до нуля. Після розряду накопичуючого конденсатора ключ K_0 розмикається і залишається у розімкнутому стані до закінчення перетворення.

Під час дії тактового імпульсу ключ K_1 розмикається, а ключ K_2 замикається. Якщо ключ K_2 замкнений, відбувається перерозподіл заряду між конденсаторами, тобто дозуючий конденсатор C_d віддає частину свого заряду накопичуючому конденсатору C_n .

У паузі між тактовими імпульсами ключ K_2 розмикається, а ключ K_1 замикається, внаслідок чого дозуючий конденсатор заряджається до рівня опорної напруги, а накопичуючий конденсатор зберігає записаний на ньому рівень напруги незмінним.

Значення напруги на накопичуючому конденсаторі C_n після довільного за порядком N -го тактового імпульсу

$$U_N = [1 - \zeta^N] U_0, \quad (1)$$

$$\text{де } \zeta = \frac{C_n}{C_n + C_d}.$$

Розглянемо два варіанти роботи ЛАЦП згідно з підведенням вхідного сигналу $U_{ВХ}$ до компаратора:

- з безпосереднім підведенням $U_{ВХ}$, як у ЛАЦП з перерозподілом заряду;
- з підведенням $U_{ВХ}$ через схему віднімання.

Якщо вхідний сигнал $U_{ВХ}$ підводиться безпосередньо до компаратора і після N -го тактувального імпульсу напруга на накопичуючому конденсаторі U_N дорівнюватиме вхідній напрузі $U_{ВХ}$, тобто

$$U_N = U_{ВХ}, \quad (2)$$

то спрацює компаратор K_m і видає сигнал "Кінець перетворення". Тоді вираз (1) можна записати як

$$U_{ВХ} = [1 - \zeta^N] U_0. \quad (3)$$

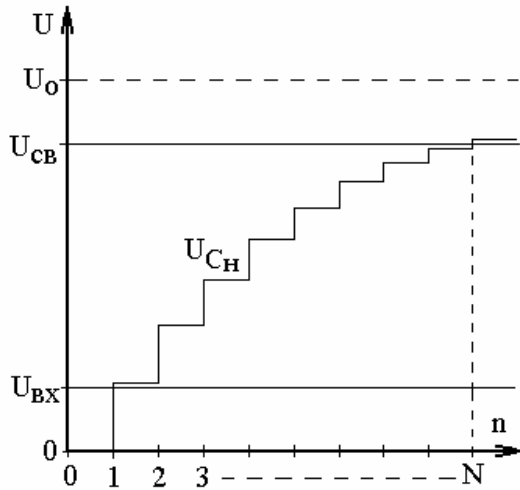


Рис. 3. Етюри напруг спрощеної схеми ЛАЦП з НЗ на пасивній паралельній КК

У другому випадку, з підведенням U_{BX} через схему віднімання (рис. 2), до компаратора підводиться вихідна напруга схеми віднімання (U_{CB}), тобто замість U_{BX} підводиться $U_{CB} = U_0 - U_{BX}$. Тоді характеристика перетворення (4) набуває вигляду:

$$N = \frac{1}{\log \zeta} \log \frac{U_{BX}}{U_0}. \quad (5)$$

З останнього виразу (5) випливає: кількість тактових імпульсів N , що надходить на конденсаторну комірку за час перетворення, пропорційна до відношення вхідної напруги до опорної. Отже, перетворювач з накопиченням заряду на пасивній паралельній КК, у який введено схему віднімання, є справді логарифмічним АЦП, тобто його похибка невідповідності логарифма дорівнює нулеві.

Порівнюючи характеристики перетворення ЛАЦП з перерозподілом заряду і ЛАЦП з накопиченням заряду у пасивних паралельних конденсаторних комірках, бачимо, що вони є ідентичними. З цього можемо зробити висновок, що ідентичними є і їхні точнісні властивості, проте в останніх може бути збільшена швидкодія за рахунок меншої сталої часу накопичення.

Схемна реалізація логарифмічного АЦП з накопиченням заряду на пасивній паралельній КК наведена на рис. 4, де позначено: ГПІ – генератор тактових імпульсів; ФПІ – формувач імпульсних послідовностей Ф1 і Ф2, який містить тригер (Т) і перший та другий елементи І (І1 та І2); ОВ – одновібратор; ДОН – джерело опорної напруги; К0-К3 – ключі 0 – 3; С_д – дозуючий конденсатор; С_н – накопичуючий конденсатор; БК – буферний каскад; Км – компаратор; СВ – схема віднімання; ЛР – лічильник результату; РР – регістр результату; N – вихідний код, КП – сигнал “Кінець перетворення”.

Розглянемо роботу логарифмічного АЦП за схемою рис. 4. За командою "Пуск" одновібратор ОВ виробляє імпульс, яким логарифмічний АЦП установлюється в початковий стан, зокрема:

- обнулюється лічильник результату ЛР;
- обнулюється формувач імпульсних послідовностей ФПІ і блокується його робота;
- замикається ключ К0, через який розряджається до нульового рівня накопичуючий конденсатор С_н.

Після закінчення імпульсу одновібратора розпочинається перерозподіл заряду і накопичення заряду на С_н, як було описано вище.

Буферний каскад необхідний для того, щоб вхідним струмом компаратора не розряджався накопичуючий конденсатор С_н, тобто щоб підвищити точність ЛАЦП. Буферний каскад виконано за схемою повторювача напруги на операційному підсилювачі (ОП), в результаті чого він має найвищий зі всіх можливих схем вхідний опір.

З останнього виразу (3) випливає, що кількість тактових імпульсів (яку підраховує лічильник, на схемі умовно не показаний) від початку перетворення до моменту спрацювання компаратора дорівнюватиме

$$N = \frac{1}{\log \zeta} \log \left(1 - \frac{U_{BX}}{U_0}\right). \quad (4)$$

Аналізуючи отриману характеристику перетворення, бачимо, що вона не відповідає логарифмічній залежності, оскільки одиниця у виразі в дужках є більшою від відношення $\frac{U_{BX}}{U_0}$ і нехтувати нею не можна. Отже, у варіанті з безпосереднім підведенням вхідного сигналу U_{BX} до компаратора виникає значна похибка невідповідності логарифма і такий перетворювач є лише нелінійним, але не логарифмічним.

Отже, у варіанті з безпосереднім підведенням вхідного сигналу U_{BX} до компаратора виникає значна похибка невідповідності логарифма і такий перетворювач є лише нелінійним, але не логарифмічним.

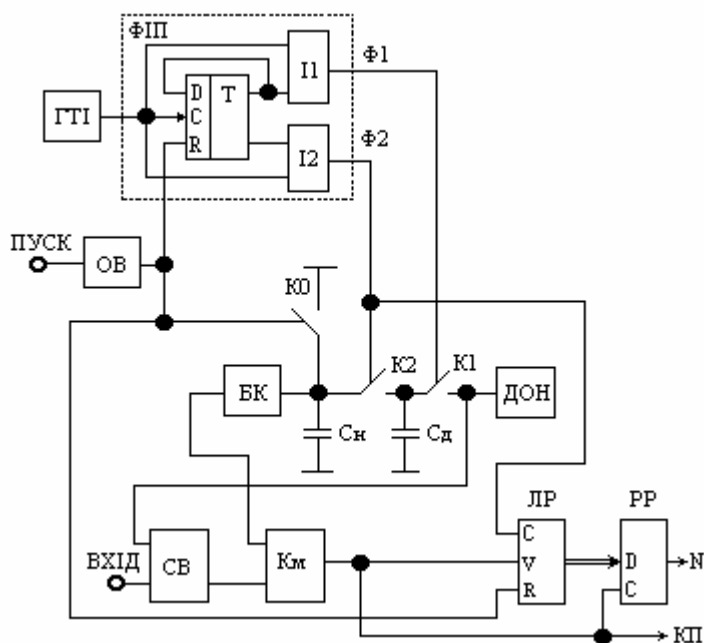


Рис. 4. Функціональна схема ЛАЦП з НЗ на пасивній паралельній КК

На точність ЛАЦП впливатиме і компаратор, оскільки його напруга зміщення визначатиме мінімальне значення кроку квантування. Оскільки сучасні інтегральні компаратори звичайно мають напругу зміщення 1 – 3 мВ, то необхідно передбачити способи її зменшення. Найпростіше цього досягти, зробивши компаратор двокаскадним. Перший каскад компаратора виконується на прецизійному операційному підсилювачі з малим значенням напруги зміщення, наприклад, на ОП типу К140УД17А, напруга зміщення якого не перевищує 75 мкВ. Щоб не було істотного зниження швидкодії компаратора (через малу швидкість наростання вихідної напруги прецизійного ОП), другий каскад виконується на серійному інтегральному компараторі, наприклад, К554СА3А, на перший вхід якого подається вихідна напруга першого каскаду, а на другий вхід – порогова напруга, значення якої вибирають набагато більшим за напругу зміщення серійного компаратора, але не більшим за 50–100 мВ. У результаті двокаскадний компаратор має напругу зміщення, що визначається операційним підсилювачем на вході, і швидкодію, лише незначно нижчу від серійного інтегрального компаратора.

До лічильника результату особливих вимог не ставиться – він повинен лише підрахувати кількість імпульсів послідовності Ф2, яка надійде на вхід ключа перерозподілу заряду К2.

Регістр результату РР вводиться в схему для того, щоб зберігати результат між двома перетвореннями і звільнити ЛР для роботи у наступному перетворенні. Результат перетворення N записується в РР вихідним імпульсом компаратора Км.

Джерело опорної напруги повинно забезпечувати підвищену стабільність напруги. Тому воно виконане двокаскадним: перший каскад – параметричний стабілізатор напруги на прецизійному стабілітроні, наприклад, типу КС191У, що забезпечує основну похибку напруги стабілізації в межах 0,001 %, а другий – масштабуючий перетворювач на прецизійному операційному підсилювачі для приведення вихідної напруги параметричного стабілізатора до рівня 10 В.

Щоб підвищити точність, не допускаючи перевантажень ДОН при заряджанні дозуючого конденсатора С_д, аналоговий ключ К1 доцільно виконати за схемою, запропонованою у [7]. Цей ключ містить операційний підсилювач і три ключові елементи (якими, власне, є інтегральні аналогові ключі на польових транзисторах). Особливістю ключа є те, що як вихід ОП, так і інвертуючий вхід ОП під'єднані до навантаження через перший і другий ключові елементи (КЕ1 і КЕ2), а між інвертуючим входом ОП і виходом ОП встановлено третій ключовий елемент (КЕ3), який працює у протифазі до перших двох ключових елементів КЕ1 і КЕ2. Тому у розімкнутому стані такого аналогового ключа (КЕ1 і КЕ2 -розімкнуті) ОП охоплений 100 % зворотним зв'язком по напрузі через замкнутий КЕ3, тобто схема являє собою повторювач напруги, і на виході ОП відобрається рівень підведеної до ключа вхідної напруги. За рахунок цього перехід від розімкнутого стану (КЕ1 і КЕ2 – розімкнуті) до

замкнутого стану (КЕ1 і КЕ2 – замкнуті) відбувається без перехідних процесів в ОП, бо напруга на виході ОП завжди має рівень опорної напруги. Це сприяє підвищенню точності при перерозподілі заряду в конденсаторній комірці логарифмічного АЦП.

Крім того, підвищенню точності логарифмічного АЦП сприяє і те, що при зміні стану ключа К1 на виході джерела опорної напруги завжди зберігається режим неробочого ходу, оскільки вхідний опір ключа К1 фактично дорівнює синфазному опору ОП, тобто досягає 100 МОм.

Щоб уникнути перевантаження ключа К0 при розряджанні на спільну шину накопичуючого C_H конденсатора, необхідно у стокове коло ключового елемента увімкнути обмежуючий опір близько 100 Ом.

3.2. Логарифмічні АЦП з накопиченням заряду на пасивних послідовних конденсаторних комірках. Основою таких ЛАЦП у найпростішому випадку є конденсаторна комірка з компаратором (рис. 5). На рисунку позначено: C_H і C_D – накопичуючий і дозуючий конденсатори; К1-К4 – ключі; Км – компаратор; І – інвертор; U_O – опорна напруга; $U_{ВХ}$ – вхідна напруга; U_1 – вихідна напруга конденсаторної комірки після дії і-го тактувального імпульсу.

Розглянемо роботу схеми рис. 5. Після надходження тактувального імпульсу розмикаються ключі К3, К4 і замикаються ключі К1, К2. Конденсатори C_D і C_H заряджаються від джерела опорної напруги і, оскільки вони увімкнені послідовно, то швидше зарядиться C_D , ємність якого меншою. Із закінченням заряду C_D припиняється і заряд C_H . Фактично конденсатори C_D і C_H утворюють подільник напруги U_O з коефіцієнтом ділення, що визначається співвідношенням його ємностей за формулою

$$K = \frac{C_D}{C_H + C_D}.$$

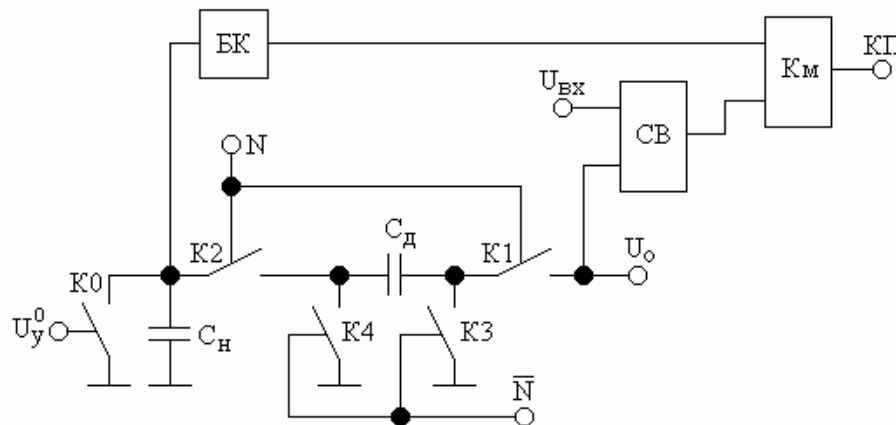


Рис. 5. Спрощена функціональна схема ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці

Після закінчення тактувального імпульсу ключі К1 і К2 розмикаються, а ключі К3 і К4 замикаються; при цьому дозуючий конденсатор C_D розряджається до нуля, а накопичуючий конденсатор C_H зберігає записане на ньому значення напруги.

Значення напруги на накопичуючому конденсаторі C_H після довільного за порядком N-го тактового імпульсу буде дорівнювати

$$U_N = [1 - (1 - K)^N] U_O. \quad (6)$$

Як бачимо, вираз (6) збігається з виразом (1), оскільки

$$1 - K = \zeta. \quad (7)$$

Отже, характеристики перетворення ЛАЦП з накопиченням заряду на пасивних послідовних і паралельних конденсаторних комірках однакові, тобто відповідають виразові (4) при безпосередньому підведенні вхідного сигналу $U_{ВХ}$ до компаратора і виразові (5) при підведенні $U_{ВХ}$ до компаратора через схему віднімання СВ.

Схема реалізація ЛАЦП з накопиченням заряду на пасивній послідовній конденсаторній комірці наведена на рис. 6, де позначено: ГП – генератор тактових імпульсів; ФП – формувач імпульсних

послідовностей $\Phi 1$ і $\Phi 2$, який містить тригер (Т) і перший та другий елементи І ($I1$ та $I2$); ОВ – одновібратор; ДОН – джерело опорної напруги; К0-К4 – ключі 0 – 4; C_d – дозуючий конденсатор; C_n – накопичуючий конденсатор; СВ – схема віднімання, Км – компаратор; БК – буферний каскад; ЛР – лічильник результату; РР – реєстр результату; N – вихідний код, КП – сигнал “Кінець перетворення”.

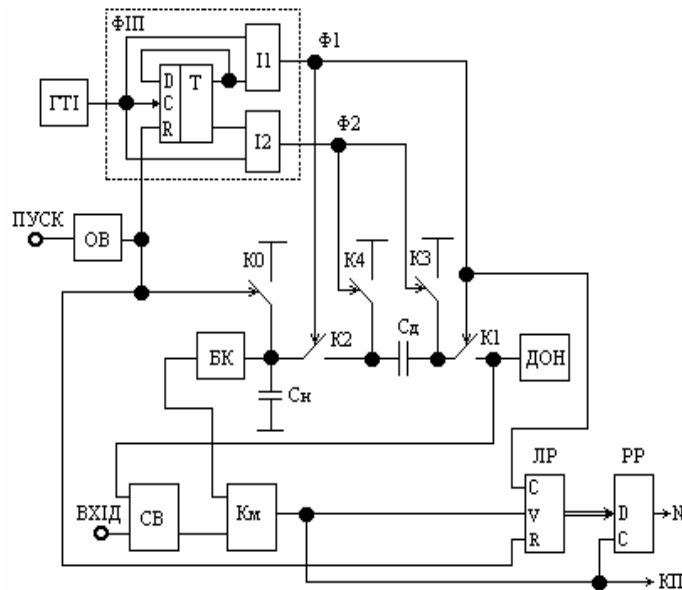


Рис. 6. Функціональна схема ЛАЦП з НЗ на пасивній послідовній конденсаторній комірці

Робота логарифмічного АЦП за схемою рис. 6 зрозуміла з описаного вище, а особливості виконання окремих функціональних вузлів відповідають схемі рис. 4. Лише зауважимо, щоб уникнути перевантажень ключів К0, К3 і К4 при розряджанні на спільну шину накопичуючого C_n і дозуючого C_d конденсаторів, необхідно у стокові кола їхніх ключових елементів увімкнути обмежуючі опори близько 100 Ом.

Підсумовуючи сказане в п.3, відзначимо таке:

а) ЛАЦП з накопиченням заряду на пасивних конденсаторних комірках дають змогу досягти середньої та високої точності;

б) характеристики перетворення ЛАЦП з накопиченням заряду на пасивних конденсаторних комірках і ЛАЦП з перерозподілом заряду є ідентичними, але в ЛАЦП з накопиченням заряду можна досягти вищої швидкодії.

Властивості ЛАЦП з накопиченням заряду на активних конденсаторних комірках будуть розглянуті у продовженні статті (частина 2).

1. Мичуда З.Р. Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі – АЦП майбутнього. – Львів: Простір, 2002. – 242 с. 2. Матецька Л.А., Мичуда З.Р. Логарифмічний аналого-цифровий перетворювач з накопиченням заряду // Автоматика, вимірювання та керування, 2000. – Вип. 389. – С. 140–146. 3. Матецька Л.А., Мичуда З.Р. Логарифмічний аналого-цифровий перетворювач з накопиченням заряду на послідовно включених конденсаторах // Зб. наукових праць “Комп’ютерні технології друкарства”. – Л.: Українська академія друкарства, 2000, № 5. – С. 36–43. 4. Мичуда З.Р. Моделювання впливу паразитних міжелектродних ємностей логарифмічних АЦП з накопиченням заряду на пасивних конденсаторних комірках // Вимірювальна техніка і метрологія, 2001. – Вип. 58. – С. 26–32. 5. Мичуда З.Р. Моделювання впливу струмів витікання в логарифмічних АЦП з накопиченням заряду на паралельних пасивних конденсаторних комірках // Автоматика, вимірювання та керування, 2004. – Вип. 500. – С. 57–61. 6. Мичуда З.Р., Мичуда Л.З., Антонів У.С. Моделювання впливу паразитних міжелектродних ємностей в логарифмічних АЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках // Теплоенергетика. Інженерія довіклля. Автоматизація, 2008. – Вип. 617. – С. 163–170. 7. Мичуда З.Р., Лукашевич В.П. Логарифмический аналого-цифровой преобразователь: А.с.1425726 СССР. – 1988, Б.И. 35.