

## ЛОГАРИФМІЧНІ АЦП З НАКОПИЧЕННЯМ ЗАРЯДУ НА ПОСЛІДОВНИХ ПАСИВНИХ КОНДЕНСАТОРНИХ КОМІРКАХ

© Мичуда З. Р., Мичуда Л. З., Антонів У. С., 2016

**Запропоновано математичні моделі логарифмічних АЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках і похибок. Наведено результати моделювання, дано оцінку динамічних властивостей і точності.**

**The mathematical models of logarithmic ADCs based on accumulation of a charge in serial passive condensers cells and their errors are offered, the results of modelling are presented, the valuation of dynamic property and accuracy are given.**

### Вступ

Сьогодні найвищі технічні характеристики забезпечують логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі (ЛАЦП) на комутованих конденсаторах, які вперше були реалізовані на кафедрі автоматики та телемеханіки Національного університету “Львівська політехніка” [1]. Ці ЛАЦП реалізують на основі явищ перерозподілу і накопичення заряду у комутованих конденсаторних комірках. Залежно від виконання конденсаторні комірочки (КК) можуть бути активними або пасивними – перші відрізняються від других тим, що містять, окрім конденсаторів і аналогових ключів, ще й підсилювачі. Хоч дослідження ЛАЦП на комутованих конденсаторах розглядають багато робіт [1–9], ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках [2, 3, 6] вивчені недостатньо, а відсутність їх математичного моделювання ускладнює практичну реалізацію і оптимізацію.

**Мета роботи** – дослідити принципи побудови ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках, розробити математичні моделі цих перетворювачів і їх похибок, оцінити динамічні властивості і точності з урахуванням параметрів сучасних елементів.

### Фізична модель ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній КК

Розглянемо особливості фізичного моделювання ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці. Схемну реалізацію такого ЛАЦП показано на рис. 1, де позначено: ГТІ – генератор тактових імпульсів; ФІП – 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;  $C_H$  – накопичувальний конденсатор; СВ – схему віднімання; Км – компаратор; БК – буферний каскад; ЛР – лічильник результату; РР – реєстр результату; N – вихідний код; КП – сигнал “Кінець перетворення”.

Розглянемо роботу логарифмічного АЦП за схемою рис. 1. За командою “Пуск” одновібратор ОВ виробляє імпульс, яким логарифмічний АЦП устанавлюється в початковий стан, зокрема: а) обнулюється лічильник результату ЛР; б) обнулюється формувач імпульсних послідовностей ФІП і блокується його робота; в) замикається ключ К0, через який розряджається до нульового рівня накопичувальний конденсатор  $C_H$ .

Після закінчення імпульсу одновібратора розпочинається перерозподіл заряду і процес накопичення заряду на  $C_H$  з кожним тактовим імпульсом.

Буферний каскад необхідний для того, щоб вхідним струмом компаратора не розряджався накопичувальний конденсатор  $C_H$ , тобто, щоб підвищити точність ЛАЦП. Буферний каскад виконується за схемою повторювача напруги на операційному підсилювачі (ОП), в результаті чого має найвищий з усіх можливих схем вхідний опір.

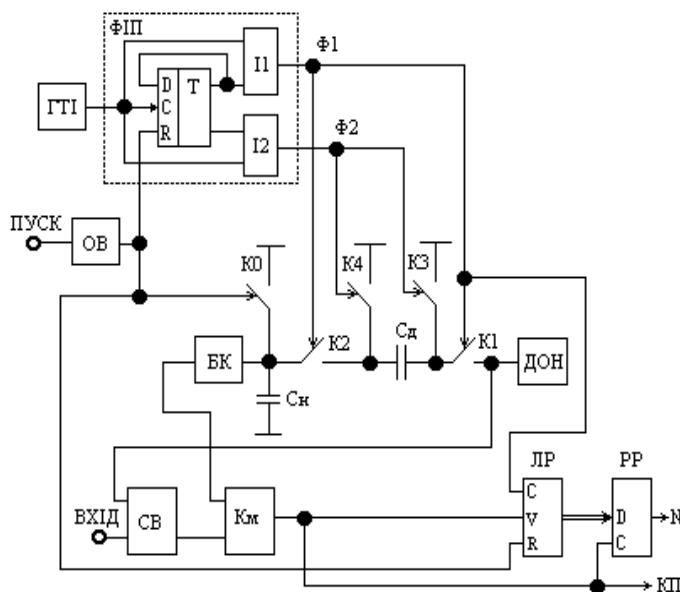


Рис. 1. Функціональна схема ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці

На точність ЛАЦП впливатиме і компаратор, оскільки його напруга зміщення визначатиме мінімальне значення кроку квантування. Оскільки сучасні інтегральні компаратори переважно мають напругу зміщення 1 – 3 мВ, то необхідно передбачити шляхи її зменшення. Найпростіше це виконується за допомогою побудови компаратора 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 (за рахунок малої швидкості наростання вихідної напруги прецизійного ОП), другий каскад виконують на серійному інтегральному компараторі, наприклад К554СА3А, на перший вхід якого подається вихідна напруга першого каскаду, а на другий вхід – порогова напруга, значення якої вибирається 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, що поступить на вхід ключа перерозподілу заряду К2.

Регістр результату РР вводиться у схему для того, щоб зберігати результат між двома перетвореннями і звільнити ЛР для роботи у наступному перетворенні. Результат перетворення N записується у 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 у межах 0,001 %, а другий – масштабуючий перетворювач на прецизійному операційному підсилювачі для приведення вихідної напруги параметричного стабілізатора до рівня 10 В.

З метою підвищення точності за рахунок виключення перевантажень ДОН за заряду дозуючого конденсатора  $C_d$  аналоговий ключ К1 доцільно виконати за схемою, запропонованою у [10]. 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, підключені до навантаження через перший і другий ключові елементи (КЕ1 і КЕ2), а між інвертуючим входом ОП і виходом ОП включений третій ключовий елемент (КЕ3), який працює у протифазі до перших двох ключових елементів КЕ1 і КЕ2. Тому у розімкненому стані такого аналогового ключа (КЕ1 і КЕ2 – розімкнуті) ОП охоплений 100 %-м зворотним зв'язком по напрузі через замкнений КЕ3, тобто схема являє собою повторювач напруги, і на виході ОП відобрається рівень підведеної до ключа вхідної напруги. За рахунок цього перехід від розімкненого стану (КЕ1 і КЕ2 – розімкнені) до замкненого стану (КЕ1 і КЕ2 – замкнені) відбувається без перехідних процесів в ОП, оскільки напруга на виході ОП завжди має рівень опорної напруги. Це сприяє підвищенню точності під час перерозподілу заряду у конденсаторній комірці ЛАЦП.

Окрім того, підвищенню точності ЛАЦП сприяє і те, що за зміни стану ключа К1 на виході джерела опорної напруги завжди зберігається режим неробочого ходу, бо вхідний опір ключа К1 фактично дорівнює синфазному опору ОП, тобто досягає 100 МОм.

Зауважимо, щоб уникнути перевантажень ключів К0, К3 і К4 за розряду на спільну шину накопичувального  $C_H$  і дозуючого  $C_D$  конденсаторів, необхідно у стокові кола їх ключових елементів включити обмежувальні опори порядку 100 Ом.

Із аналізу особливостей побудови ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці випливає, що не усі функціональні вузли впливають на його точність. Тому для аналізу похибок доцільно використати показану на рис. 2 спрощену функціональну схему ЛАЦП, де позначено:  $C_H$  і  $C_D$  – накопичувальний і дозуючий конденсатори; К0-К4 – аналогові ключі 1-4; БК – буферний каскад; Км – компаратор; СВ – схема віднімання;  $U_{вх}$  і  $U_o$  – вхідна і опорна напруги;  $U_y$  – напруга управління; КП – вихід сигналу “Кінець перетворення”.

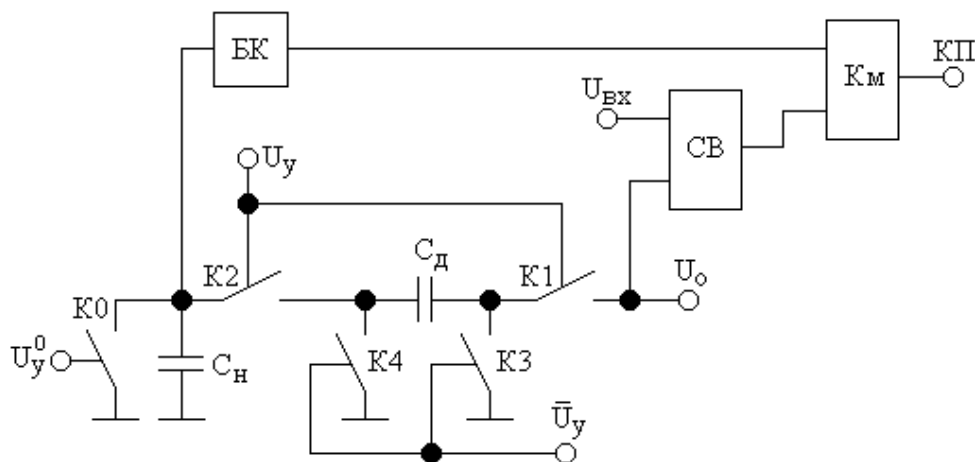


Рис. 2. Спрощена функціональна схема ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці

З метою підвищення точності ЛАЦП за рахунок унеможливлення накладання станів включення-виключення окремих ключів, як і у ЛАЦП з перерозподілом заряду, ми ввели роздільчі паузи між фазами перерозподілу і розряду. Тривалість цих пауз повинна вибиратися достатньою для надійного спрацювання ключів. Тому у кожному такті перетворення ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці будуть чотири фази роботи (Ф1–Ф4), кожна з яких визначатиме вигляд моделі ЛАЦП:

Ф1 – накопичення заряду конденсатором  $C_H$ , що відбувається за розімкнених ключів К0, К3, К4 і замкнених ключів К1, К2;

Ф2 – перша пауза, за якої розімкнені усі ключі, К0-К4;

Ф3 – розряд дозуючого конденсатора  $C_d$ , що відбувається за розімкнених ключів K0, K1, K2 і замкнених ключів K3, K4;

Ф4 – друга пауза, за якої розімкнені усі ключі, K0-K4.

Розглядаючи спрощену функціональну схему такого ЛАЦП (рис. 2), можемо відзначити, що неідеальність елементів проявлятиметься через впливи паразитних міжелектродних ємностей, струмів витікання і розузгодження ємностей конденсаторів комірок.

Вплив паразитних міжелектродних ємностей зводиться до впливу паразитних міжелектродних ємностей аналогових ключів конденсаторної комірки і вхідної ємності буферного каскаду.

Із розгляду побудови і особливостей роботи схеми ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці випливає що:

1) паразитні міжелектродні ємності аналогових ключів призводять до безпосередньої зміни ємностей накопичувального та дозуючого конденсаторів;

2) за замкнених ключів K1, K2 (накопичення заряду накопичувальним конденсатором  $C_n$ ) напруга управління  $U_y$  проникає через міжелектродні ємності ключа K2 затвор-стік ( $C_{зс2}$ ) і затвор-витік ( $C_{зв2}$ ) на паралельно з'єднані накопичувальний  $C_n$  і дозуючий  $C_d$  конденсатори, а паразитна ємність  $C_{зс2}$  накопичує паразитний заряд, пропорційний до суми напруги управління та напруги на накопичувальному конденсаторі;

3) за замкнених ключів K3, K4 і розімкнених ключів K1, K2 (розряд дозуючого конденсатора через замкнені ключі K3, K4) паразитний заряд, накопичений ємністю  $C_{зс2}$  під час дії напруги управління  $U_y$ , передається на накопичувальний конденсатор, змінюючи рівень напруги на ньому.

Отже, внаслідок впливу паразитних міжелектродних ємностей у ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках є такі ефекти: а) безпосередня зміна ємностей дозуючого і накопичувального конденсаторів; б) проникнення напруги управління; в) передача паразитного заряду.

Окрім паразитних ємностей, похибку перетворення таких ЛАЦП викликать і струми витікання компонентів схеми, зокрема, дозуючого та накопичувального конденсаторів, аналогових ключів (K0-K4), а також вхідний струм буферного каскаду.

Проаналізуємо впливи усіх вищезгаданих паразитних факторів на роботу ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках.

### Оцінка динамічних властивостей ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці

Під час фізичного моделювання ЛАЦП з накопиченням заряду на комутованих конденсаторах необхідно враховувати, що їх динамічні властивості фактично повністю визначаються часом заряду та розряду накопичувального і дозуючого конденсаторів КК. Визначаючи згадані інтервали часу, потрібно врахувати, що ємність накопичувального конденсатора набагато більша від ємності дозуючого конденсатора.

Коло заряду накопичувального конденсатора можна подати як аперіодичну ланку першого порядку (рис. 3) і тому напруга на ньому змінюватиметься в часі, як

$$U_{C_n}(t) = U_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \quad (1)$$

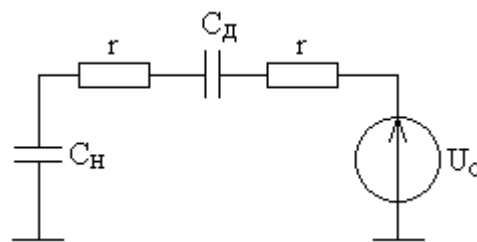


Рис. 3. Коло заряду накопичувального конденсатора

Стала заряду накопичувального конденсатора становитиме

$$\tau_3 = 2r \frac{C_H C_D}{C_H + C_D}, \quad (2)$$

де  $r$  – опір замкненого ключа.

За ємності дозуючого конденсатора  $C_D=1$  нФ (що відповідає похибці квантування 0,1 % за  $C_H=1$  мкФ) і опору замкненого ключа 70 Ом отримаємо сталу заряду накопичувального конденсатора  $\tau_3=140$  нс і для похибки недозаряду 0,015 % за  $N=10000$  час заряду потрібно задати не меншим за  $18\tau_3$ , тобто 2,5 мкс.

Кола розряду як дозуючого, так і накопичувального конденсатора також можна подати аперіодичними ланками першого порядку (рис. 4, 5).

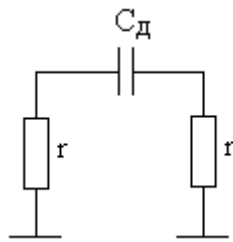


Рис. 4. Коло розряду дозуючого конденсатора

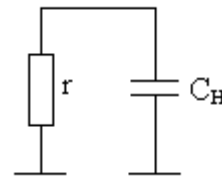


Рис. 5. Коло розряду накопичувального конденсатора

За розряду дозуючого конденсатора послідовно з ним включені два замкнені ключі і тому його стала розряду ( $\tau_{рд}$ )

$$\tau_{рд} = 2rC_D. \quad (3)$$

Розряд дозуючого конденсатора супроводжується накопиченням похибки недорозряду, яка визначається аналогічно до похибки недозаряду.

За ємності дозуючого конденсатора  $C_D=1$  нФ і опору замкненого ключа 70 Ом отримаємо сталу розряду дозуючого конденсатора  $\tau_{рд}=140$  нс і для похибки недорозряду 0,015 % за  $N=10000$  час розряду потрібно задати не меншим від  $18\tau_{рд}$ , тобто 2,5 мкс.

Отже, час розряду дозуючого конденсатора фактично дорівнює часу заряду накопичувального конденсатора, тобто 2,5 мкс.

Стала часу розряду накопичувального конденсатора ( $\tau_{рн}$ ) визначається так:

$$\tau_{рн} = rC_H. \quad (4)$$

За ємності накопичувального конденсатора  $C_H=1$  мкФ і опору замкненого ключа 70 Ом отримаємо  $\tau_{рн} = 70$  мкс.

Оскільки розряд накопичувального конденсатора відбувається одноразово (перед початком перетворення), то накопичення похибки від недорозряду  $C_H$  немає. Тому, щоб знехтувати похибкою від недорозряду накопичувального конденсатора, потрібно вибрати час розряду не меншим за  $12\tau_{рн}$ , тобто 0,84 мс (при цьому похибка від недорозряду накопичувального конденсатора менша за 0,005 %).

Для зменшення часу розряду накопичувального конденсатора можна використати покращений ключ [11], замкнений опір якого не перевищує 0,01 Ом. Тоді стала часу розряду накопичувального конденсатора  $\tau_{рн} \leq 10$  нс за ємності накопичувального конденсатора  $C_H=1$  мкФ. Щоб похибка від впливу недорозряду накопичувального конденсатора не перевищувала 0,005 %, достатньо вибрати час розряду не меншим за  $12\tau_{рн}$ , тобто 120 нс.

Особливістю ЛАЦП з НЗ на послідовних пасивних конденсаторних комірках є наявність схеми віднімання СВ на одному з входів компаратора (нагадаємо, на другий вхід компаратора подається компенсуючий сигнал з виходу конденсаторної комірки). Тому вихідний сигнал СВ, що відповідає стрибку вхідного сигналу, відробляється так само, як і у регульованому масштабному перетворювачі (РМП) ЛАЦП з НЗ на активних конденсаторних комірках [7].

Вихідний сигнал СВ, що відповідає стрибку вхідного сигналу, відробляється через деякий час  $t_{св}$ :

$$t_{св} = t_{зат} + t_y + t_d, \quad (5)$$

де  $t_{зат}$  – час затримки;  $t_y$  – час установки;  $t_d$  – час досягнення вихідним сигналом рівня вхідного сигналу, причому

$$t_d = \frac{U_{вх}}{V}. \quad (6)$$

де  $V$  – швидкість наростання вихідного сигналу ОП.

Для швидкодіючих ОП [2] час затримки  $t_{зат}$  не перевищує 100 нс, час установки  $t_y$  досягає 500–600 нс, а швидкість  $V$  наростання вихідного сигналу – 10–50 В/мкс (для особливо швидкодіючих ОП – 250 В/мкс).

Отже, для швидкодіючих ОП час досягнення вихідної напруги СВ становитиме

$$t_o = (0,2-1) \text{ мкс},$$

а час відпрацювання вихідного сигналу СВ:

$$t_{св} = (0,8-1,7) \text{ мкс}.$$

Отже, для ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовних конденсаторних комірках тривалість як імпульсу заряду накопичувального конденсатора  $C_n$ , так і імпульсу розряду дозуючого конденсатора  $C_d$  має бути не меншою за 2,5 мкс, а тривалість імпульсу одновібратора (розряд накопичувального конденсатора  $C_n$ , тобто початкова установка) – не меншою за 0,12 мкс. Потрібні тривалості імпульсів забезпечимо відповідним виконанням формувача імпульсних послідовностей.

### Висновки

Підсумовуючи проведені дослідження, відзначимо:

1. У ЛАЦП з НЗ на послідовних пасивних конденсаторних комірках можна досягти вищої точності порівняно з ЛАЦП на паралельних комірках і ЛАЦП з перерозподілом заряду, оскільки у них відсутня похибка від передачі паразитного заряду ключа розряду; ця обставина значно спрощує реалізацію ЛАЦП на послідовних комірках, бо немає необхідності у компенсації згаданої похибки, і це дає змогу знизити основну похибку перетворення цих ЛАЦП до 0,25 % за часу перетворення, не більшого за 20 мс.

2. Динамічні властивості ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках фактично повністю визначаються часом заряду та розряду накопичувального і дозуючого конденсаторів. Так, за даними схеми  $C_d=1$  нФ і  $C_n=1$  мкФ (що відповідає похибці квантування 0,1 %) і опору замкненого ключа 70 Ом і кількості тактів перетворення  $N=10000$ :

– стала часу заряду накопичувального конденсатора  $\tau_3=140$  нс і для похибки недозаряду 0,015 % (з урахуванням накопичення похибки за  $N$  тактів) час заряду потрібно задати не меншим за  $18\tau_3$ , тобто 2,5 мкс;

– стала часу розряду дозуючого конденсатора  $\tau_{рд}=140$  нс і для похибки недорозряду  $d_{рд} \leq 0,015$  % (з урахуванням накопичення похибки за  $N$  тактів) час розряду  $C_d$  треба задати не меншим за  $18\tau_{рд}$ , тобто 2,5 мкс. Отже, час розряду дозуючого конденсатора фактично дорівнює часу заряду накопичувального конденсатора, тобто 2,5 мкс;

– стала часу розряду накопичувального конденсатора  $\tau_{рн} = 70$  мкс. Оскільки розряд накопичувального конденсатора відбувається одноразово (перед початком перетворення), то накопичення похибки  $\delta_{рн}$  від недорозряду накопичувального конденсатора немає. Тому, щоб  $\delta_{рн}$  була меншою за 0,005 % і нею можна було б знехтувати, потрібно вибрати час розряду  $C_n$  не меншим за  $12\tau_{рн}$ , тобто 0,84 мс;

– під час використання ключів з меншим опором у замкненому стані час заряду та розряду накопичувального та дозуючого конденсаторів можна пропорційно зменшити, наприклад, використавши згаданий вище покращений ключ, замкнений опір якого не перевищує 0,01 Ом. Тоді стала часу розряду накопичувального конденсатора  $\tau_{рн} \leq 10$  нс і, щоб похибка від недорозряду накопичувального конденсатора не перевищувала 0,005 %, достатньо вибрати час розряду не меншим за  $12\tau_{рн}$ , тобто 120 нс.

1. А. с. 819948 ССРСР. Способ определения логарифма / Мычуда З. Р., Дудыкевич В. Б. – 1982, Б. И. 29. 2. Мычуда З. Р. Логарифмічні Аналого-Цифрові Перетворювачі – АЦП майбутнього. – Львів: Простір, 2002. – 242 с. 3. Матецька Л. А., Мычуда З. Р. Логарифмічний аналого-цифровий перетворювач з накопиченням заряду на послідовно включених конденсаторах // Зб. наук. пр. “Комп’ютерні технології друкарства”. – Львів: Українська академія друкарства, 2000. – № 5. – С. 36–43. 4. Патент 43364 Україна. Способ логарифмічного аналого-цифрового перетворення / Мычуда З. Р. – 2001, Бюл. № 11. 5. Мычуда З., Мычуда Л., Антонів У., Шиманський А. Моделювання впливу паразитних міжелектродних ємностей в логарифмічних АЦП з накопиченням заряду з імпульсним від’ємним зворотним зв’язком // Міжвідомчий зб. “Вимірювальна техніка і метрологія”. – Львів: Вища шк., 2010. – Вип. 71. – С. 13–19. 6. Мычуда З. Р., Мычуда Л. З., Католик Б. О., Коструба О. Р. Підвищення точності та швидкодії логарифмічних аналого-цифрових перетворювачів // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2006. – Спецвипуск. – С. 203–205. 7. Мычуда З. Р. Логарифмічні АЦП з накопиченням заряду в активних конденсаторних комірках. Моделювання впливу паразитних ємностей // Міжвідомчий наук.-техн. зб. “Вимірювальна техніка і метрологія”. – Львів: Вища шк., 2002. – Вип. 59. – С. 81–87. 8. Myczuda Z., Szcześniak A / A method of charge accumulation in the logarithmic analog-to-digital converter with a successive approximation // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 86 NR 10/2010, str.336–340. 9. Antoniów U., Myczuda L., Myczuda Z., Szcześniak A. Logarytmiczne przetworniki analogowo-cyfrowe z nagromadzeniem ładunku i impulsowym sprzężeniem zwrotnym // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R.89, NR 8/2013, str. 277–281. 10. А. с. 1425726 ССРСР. Логарифмический аналого-цифровой преобразователь / Мычуда З. Р., Лукашевич В. П. – 1988, Б. И. 35. 11. Мычуда З. Р. Аналоговий ключ // Вісник ДУЛП “Автоматика, вимірювання та керування”. – 1998. – Вип. 356. – С. 77–83.