

У.С.Антонів¹, З.Р.Мичуда^{1,3}, Л.З.Мичуда²

Національний університет “Львівська політехніка”,

¹кафедра комп’ютеризованих систем автоматики,

²кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів;

³Політехніка Сьвентокжиска в Кельцах, Польща

ОЦІНЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛОГАРИФМІЧНИХ АЦП З НАКОПИЧЕННЯМ ЗАРЯДУ НА ПОСЛІДОВНИХ ПАСИВНИХ КОНДЕНСАТОРНИХ КОМІРКАХ

© Антонів У.С., Мичуда З.Р., Мичуда Л.З., 2014

The mathematical models of logarithmic ADC based on accumulation of a charge in serial passiv condensers cells are offered, the results of modelling are presented and the valuation of dynamic property are given.

Keywords - logarithmic ADC, accumulation charge, serial passiv condensers cells, models, dynamics.

Запропоновано математичні моделі логарифмічних АЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках, наведено результати моделювання та дано оцінку динамічних властивостей.

Ключові слова – логарифмічні АЦП, накопичення заряду, послідовні пасивні конденсаторні комірки, моделі, динаміка.

1. Вступ

На даний час найвищі технічні характеристики забезпечують логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі (ЛАЦП) на комутованих конденсаторах, які вперше [1] були реалізовані на кафедрі автоматики та телемеханіки Національного університету “Львівська політехніка”. Ці ЛАЦП реалізують на основі явищ перерозподілу і накопичення заряду у комутованих конденсаторних комірках. В залежності від виконання конденсаторні комірки (КК) можуть бути активними або пасивними – у перші відрізняються від других тим, що містять (окрім конденсаторів і аналогових ключів) ще й підсилювачі. Хоч дослідженню ЛАЦП на комутованих конденсаторах присвячено порівняно багато робіт [1-7], ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках [1,6] вивчені в теоретичному плані недостатньо, а відсутність їх математичного моделювання ускладнює практичну реалізацію і оптимізацію.

Мета даної статті - оцінка динамічних властивостей ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках з урахуванням параметрів сучасних елементів.

2. Фізична модель ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній КК

Спрощена функціональна схема ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці (КК) наведена на рис.1, де позначено: C_n і C_d – накопичуючий 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”.

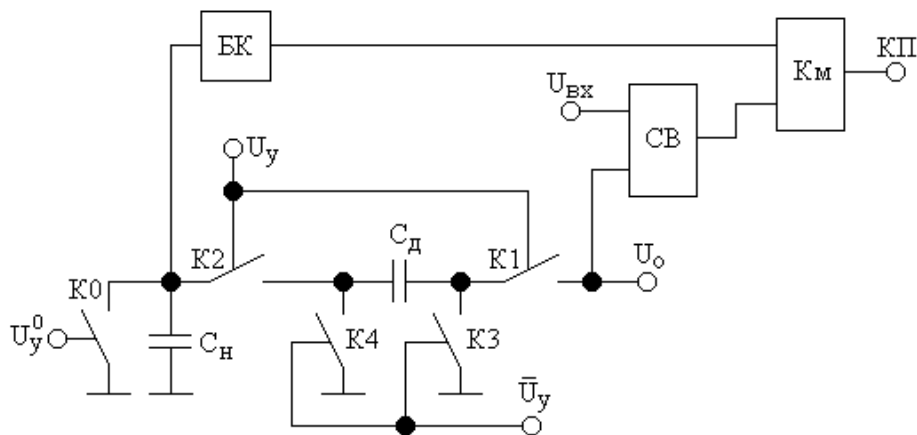


Рис.1. Спрощена функціональна схема ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці

Принцип дії ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці базується на перерозподілі заряду між двома конденсаторами, накопичуючим C_H і дозуючим C_D ; причому ємність C_H вибирається набагато більшою ємності C_D .

При поступленні на вхід керування першого тактующого імпульса розмикаються ключі К3, К4 і замикаються ключі К1, К2. Конденсатори C_D і C_H заряджаються від джерела опорної напруги U_0 , так як вони включені послідовно, то скоріше зарядиться C_D (бо його ємність є менша). З закінченням заряду C_D припиняється і заряд C_H . Фактично конденсатори C_D і C_H утворюють дільник напруги U_0 з коефіцієнтом ділення, що визначається співвідношенням його ємностей за формулою

$$K = \frac{C_D}{C_H + C_D}. \quad (1)$$

Після закінчення першого тактующого імпульса ключі К1, К2 розмикаються і ключі К3, К4 замикаються, розряджаючи C_D до нуля.

Таким чином після закінчення першого тактующого імпульса напруга на конденсаторі C_H , тобто напруга на виході конденсаторної комірки, рівна

$$U_1 = U_0 K$$

і її приріст становитиме

$$\Delta U_1 = U_0 K.$$

Під час дії другого тактующого імпульса на заряд конденсаторів впливатиме не тільки опорна напруга, а і напруга U_1 , що залишилася на C_H після дії першого тактующого імпульса. Тому, використовуючи принцип суперпозиції, знайдемо, що за час дії другого тактующого імпульса приріст напруги на конденсаторі C_H становитиме

$$\Delta U_2 = (U_0 - U_1) K \text{ або } \Delta U_2 = (1 - K) K U_0$$

і конденсатор C_H зарядиться до напруги

$$U_2 = U_1 + \Delta U_2 = [K + (1 - K) K] U_0.$$

Після закінчення другого тактующого імпульса C_D знову розрядиться до нуля через ключі К3 і К4, які замикаються під час паузи між тактующими імпульсами.

Під час дії третього тактующого імпульса приріст напруги на конденсаторі C_H становитиме

$$\Delta U_3 = (U_0 - U_2) K \quad \Delta U_3 = (1 - K)^2 K U_0$$

і конденсатор C_H зарядиться до напруги

$$U_3 = (U_2 + \Delta U_3) = [K + (1 - K) + (1 - K)^2]KU_0.$$

Аналогічно після закінчення і-го тактующого імпульса приріст напруги на накопичуючій конденсаторі C_H становитиме

$$\Delta U_i = (1 - K)^{i-1} KU_0$$

і конденсатор C_H зарядиться до напруги

$$U_i = [1 + (1 - K) + (1 - K)^2 + \dots + (1 - K)^{i-1}]KU_0.$$

Як бачимо з останнього виразу значення напруги на накопичуючому конденсаторі змінюється по закону геометричної прогресії із знаменником $q=1-K$. Тому, представляючи вираз в дужках як суму n членів геометричної прогресії за загальною відомою формулою

$$S_n = \frac{1 - a_1 q^n}{1 - q}$$

(a_1 - перший член геометричної прогресії), одержимо значення напруги на C_H після довільного за порядком і-го тактового імпульса

$$U_i = [1 - (1 - K)^i]U_0. \quad (2)$$

Якщо після N -го тактующого імпульса напруга на накопичуючому конденсаторі U_N стане рівною вхідній напрузі U_{BX} , тобто $U_N = U_{BX}$, спрацює компаратор K_m і видає сигнал "Кінець перетворення".

Останній вираз можна записати як

$$U_{bx} = [1 - (1 - K)^N]U_0$$

або

$$(1 - K)^N = (1 - \frac{U_{bx}}{U_0}).$$

Логарифмуючи останній вираз, одержимо

$$N = \frac{1}{\log \zeta} \log(1 - \frac{U_{BX}}{U_0}). \quad (3)$$

Тут

$$\zeta = 1 - K = \frac{C_H}{C_d + C_H}.$$

Аналізуючи одержану характеристику перетворення, бачимо, що вона не відповідає логарифмічній залежності, оскільки одиниця у виразі в дужках є більшою відношення U_{BX}/U_0 і нехтувати нею не можна. Отже, у розглянутому варіанті має місце значна похибка невідповідності логарифму і такий перетворювач є лише нелінійним, а не логарифмічним.

З метою забезпечення логарифмічної залежності між числом (N) тактових імпульсів, що поступить на конденсаторну комірку за час перетворення, і вхідною напругою необхідно подати на один із входів компаратора напругу з виходу конденсаторної комірки, а на другий - різницю напруг опорної та вхідної; останнє забезпечується введенням у перетворювач схеми віднімання між входом ЛАЦП і компаратором. Тоді характеристика перетворення набуває вигляду

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

З останнього виразу випливає, що число (N) тактових імпульсів, що поступить на конденсаторну комірку за час перетворення пропорційне відношенню вхідної напруги до опорної, тобто перетворювач з накопиченням заряду, у який введено схему віднімання, є дійсно логарифмічним АЦП, оскільки його похибка невідповідності логарифму рівна нулю.

Схемна реалізація ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці наведена на рис.2, де позначено: ГТІ - генератор тактових імпульсів; ФПП - формувач

імпульсних послідовностей $\Phi 1$ і $\Phi 2$, який містить лічильник (Л), тригер (Т) і перший та другий елементи І ($I1$ та $I2$); СС – схема синхронізації; ОВ - одновібратор; ДОН - джерело опорної напруги; К0-К4 - ключі 0 - 4; C_d - дозуючий конденсатор; C_n - накопичуючий конденсатор; СВ – схема віднімання; Км - компаратор; ЛР - лічильник результату; РР - регістр результату; N - вихідний код; РЕЖИМ – режим запуску, зокрема, РУЧ – ручний або АВТ – автоматичний; КП - сигнал «Кінець перетворення».

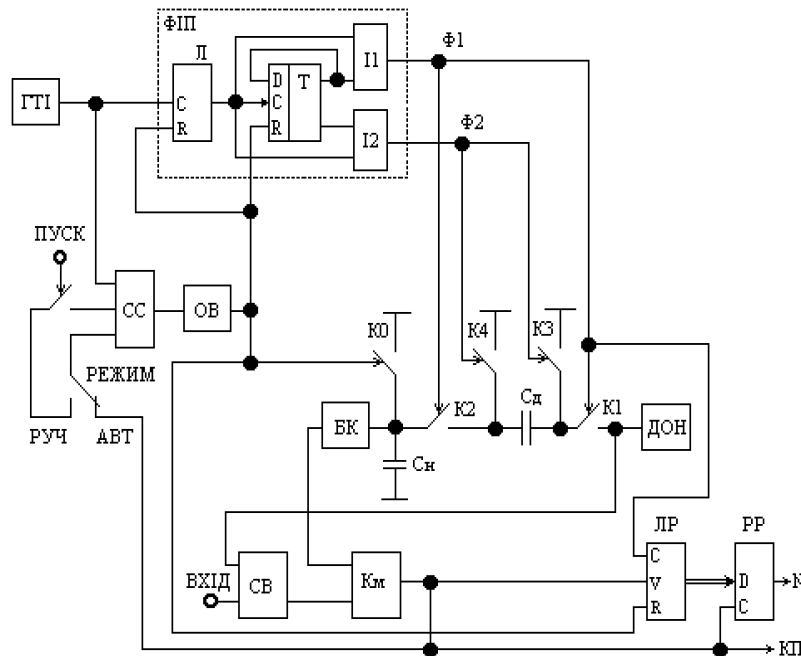


Рис.2. Функціональна схема ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірі

Розглянемо роботу логарифмічного АЦП за схемою рис.2. За командою "Пуск" одновібратор ОВ виробляє імпульс, яким логарифмічний АЦП устанавлюється в початковий стан, зокрема:

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

Після закінчення імпульса одновібратора розпочинається перерозподіл заряду і процес накопичення заряду на C_n , як було описано вище.

Сигнал з накопичуючого конденсатора C_n на компаратор Км треба подавати через буферний каскад, щоб вхідним струмом компаратора не розряджався накопичуючий конденсатор C_n . Буферний каскад виконується по схемі повторювача напруги на операційному підсилювачі (ОП) з малими вхідними струмами, наприклад, К1409УД1А. Оскільки на точність ЛАЦП впливатимуть напруги зміщення буферного каскаду і компаратора, які мають значення 1-3 мВ, то необхідно передбачити шляхи їх зменшення. Шляхом типової ручної корекції ці напруги зміщення можуть бути легко зменшені до 0,1-0,2 мВ; подальше їх зменшення вимагає введення кіл автоматичної періодичної корекції.

Схема віднімання виконується на прецизійному операційному підсилювачі з малим значенням напруги зміщення, наприклад на ОП типу К140УД17А, напруга зміщення якого не перевищує 75 мкВ і легко може бути скомпенсована до рівня одиниць мікрвольт.

До лічильника результату особливих вимог не ставиться - він повинен лише підрахувати число імпульсів послідовності Ф1, що поступить на вхід ключів перерозподілу заряду К1 і 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 виконаємо його двокаскадним: перший каскад - параметричний стабілізатор напруги на прецизійному стабілітроні, наприклад типу 2С483 Г(Д), що забезпечує основну похибку напруги стабілізації в межах 0,0001%, 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 при перерозподілі заряду аналоговий ключ К1 виконаємо за схемою, запропонованою у [4]. При зміні стану такого ключа на виході джерела опорної напруги завжди зберігається режим холостого ходу, оскільки вхідний опір ключа завжди рівний синфазному опору ОП, тобто досягає сотень МОм.

Щоб уникнути перевантажень ключів К0, К3 і К4 при розряді на спільну шину накопичуючого C_H і дозуючого C_D конденсаторів, необхідно у стокові кола їх ключових елементів включити обмежуючі опори порядку 100 Ом.

З метою підвищення точності ЛАЦП за рахунок виключення можливості 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.

Отже, у кожному такті перетворення ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці матимуть місце чотири фази роботи (Ф1-Ф4), кожна з яких визначатиме вигляд моделі ЛАЦП:

Ф1) накопичення заряду конденсатором C_H , що відбувається при розімкнутих ключах К0, К3, К4 і замкнутих ключах К1, К2;

Ф2) перша пауза, при якій розімкнуті всі ключі, К0-К4;

Ф3) розряд дозуючого конденсатора C_D , що відбувається при розімкнутих ключах К0, К1, К2 і замкнутих ключах К3, К4;

Ф4) друга пауза, при якій розімкнуті всі ключі, К0-К4.

3. Оцінювання динамічних властивостей ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці

При фізичному моделюванні ЛАЦП з накопиченням заряду на комутованих конденсаторах, необхідно враховувати, що їх динамічні властивості фактично повністю визначаються конденсаторними комірками, зокрема часом заряду та розряду накопичуючого і дозуючого конденсаторів.

Визначаючи згадані інтервали часу слід врахувати, що ємність накопичуючого конденсатора набагато більша від ємності дозуючого конденсатора.

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

$$U_{CH}(t) = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}}\right). \quad (5)$$

Стала заряду накопичуючого конденсатора становитиме

$$\tau_3 = 2r \frac{C_H C_D}{C_H + C_D}, \quad (6)$$

де r – опір замкнутого ключа.

При ємності дозуючого конденсатора $C_d=1$ нФ (що відповідає похибці квантування 0,1% при $C_n=1$ мкФ) і опорів замкнутого ключа 70 Ом отримуємо сталу заряду накопичуючого конденсатора $\tau_z=140$ нс і для похибки недозаряду 0,015% при $N=10000$ час заряду треба задати не меншим $18 \tau_z$, тобто 2,5 мкс.

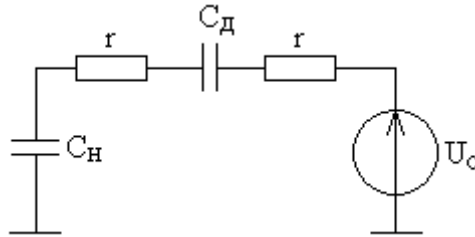


Рис.3. Коло заряду накопичуючого конденсатора

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

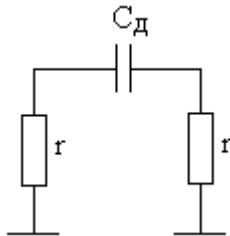


Рис.4. Коло розряду дозуючого конденсатора

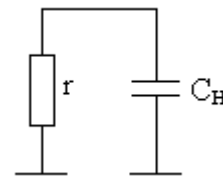


Рис.5. Коло розряду накопичуючого конденсатора

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

$$\tau_{рд} = 2rC_d. \quad (7)$$

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

При ємності дозуючого конденсатора $C_d=1$ нФ і опорів замкнутого ключа 70 Ом отримуємо сталу розряду дозуючого конденсатора $\tau_{рд}=140$ нс і для похибки недорозряду 0,015% при $N=10000$ час розряду треба задати не меншим $18 \tau_{рд}$, тобто 2,5 мкс.

Отже, час розряду дозуючого конденсатора практично рівний часу заряду накопичуючого конденсатора, тобто 2,5 мкс.

Стала часу розряду накопичуючого конденсатора ($\tau_{рн}$) визначається як

$$\tau_{рн} = rC_n. \quad (8)$$

При ємності накопичуючого конденсатора $C_n=1$ мкФ і опорів замкнутого ключа 70 Ом отримуємо $\tau_{рн} = 70$ мкс.

Оскільки розряд накопичуючого конденсатора відбувається одноразово (перед початком перетворення), то накопичення похибки від недорозряду C_n нема. Тому, щоб знехтувати похибкою

від недорозряду накопичуючого конденсатора, треба вибрати час розряду не меншим $12 \tau_{pn}$, тобто 0,84 мс (при цьому похибка від недорозряду накопичуючого конденсатора менша 0,005%).

Для зменшення часу розряду накопичуючого конденсатора можна використати покращений ключ [5], замкнутий опір якого не перевищує 0,01 Ом. Тоді стала часу розряду накопичуючого конденсатора $\tau_{pn} \leq 10$ нс при ємності накопичуючого конденсатора $C_n = 1$ мкФ. Щоб похибка від впливу недорозряду накопичуючого конденсатора не перевищувала 0,005%, достатньо вибрати час розряду не меншим $12 \tau_{pn}$, 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 [1].

Вихідний сигнал СВ, що відповідає стрибку вхідного сигналу, відробляється через деякий час t_{cv} [1]:

$$t_{cv} = t_{зат} + t_y + t_d, \quad (9)$$

де $t_{зат}$ - час затримки;

t_y - час установки;

t_d - час досягнення вихідним сигналом рівня вхідного сигналу, причому

$$t_d = \frac{U_{вх}}{V}.$$

Тут V – швидкість наростання вихідного сигналу ОП.

Для швидкодіючих ОП [1] час затримки $t_{зат}$ не перевищує 100 нс, час установки t_y досягає 500-600 нс, а швидкість V наростання вихідного сигналу досягає 10-50 В/мкс (для особливо швидкодіючих ОП – 250 В/мкс).

Отже, для швидкодіючих ОП час досягнення вихідної напруги СВ становитиме відповідно

$$t_d = (0,2 - 1) \text{ мкс},$$

а час відпрацювання вихідного сигналу СВ -

$$t_{cv} = (0,8 - 1,7) \text{ мкс}.$$

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

4. Висновки

Проведені дослідження дозволяють стверджувати, що динамічні властивості ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках фактично повністю визначаються часом заряду та розряду накопичуючого і дозуючого конденсаторів. Так, при даних схеми $C_d = 1$ нФ і $C_n = 1$ мкФ (що відповідає похибці квантування 0,1%) і опорів замкнутого ключа 70 Ом і кількості тактів перетворення $N = 10000$:

1. Стала часу заряду накопичуючого конденсатора $\tau_z = 140$ нс і для похибки недозаряду 0,015% (з урахуванням накопичення похибки за N тактів) час заряду треба задати не меншим $18 \tau_z$, тобто 2,5 мкс.

2. Стала часу розряду дозуючого конденсатора $\tau_{рд} = 140$ нс і для похибки недорозряду $\delta_{рд} \leq 0,015\%$ (з урахуванням накопичення похибки за N тактів) час розряду C_d треба задати не

меншим $18\tau_{рд}$, тобто 2,5 мкс. Отже, час розряду дозуючого конденсатора практично рівний часу заряду накопичуючого конденсатора, тобто 2,5 мкс.

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

4. При використанні ключів з меншим опором у замкненому стані час заряду та розряду накопичуючого та дозуючого конденсаторів можна пропорційно зменшити. Наприклад, для зменшення часу розряду накопичуючого конденсатора можна використати покращений ключ, замкнутий опір якого не перевищує 0,01 Ом. Тоді стала часу розряду накопичуючого конденсатора $\tau_{рн} \leq 10$ нс і, щоб похибка від недорозряду накопичуючого конденсатора не перевищувала 0,005%, достатньо вибрати час розряду не меншим $12\tau_{рн}$, тобто 120 нс.

1. Мичуда З.Р. Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі – АЦП майбутнього.- Львів: Простір, 2002.- 242 с. 2. Мичуда З.Р. Моделювання впливу паразитних міжелектродних ємностей логарифмічних АЦП з накопиченням заряду на паралельних пасивних конденсаторних комірках// Міжвідомчий наук.-техн. зб. «Вимірювальна техніка і метрологія».- Л.: Вища школа, 2001, вип. 58, с. 26-32. 3. Мичуда З.Р. Логарифмічні АЦП з накопиченням заряду в активних конденсаторних комірках. Моделювання впливу паразитних ємностей// Міжвідомчий наук.-техн. зб. «Вимірювальна техніка і метрологія».- Л.: Вища школа, 2002, вип.59, с. 81-87. 4. 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. 5. Мичуда З.Р. Аналоговий ключ/ Мичуда З.Р.// Вісник ДУЛП - Автоматика, вимірювання та керування, Л.: ДУЛП, 1998, вип.356, с.77-83.