

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

На правах рукопису  
УДК 681.3 (088.8)

ПІСКОЗУБ  
Андріян Збігнєвич

ЛОГАРИФМІЧНІ АНАЛОГО-ЦИФРОВІ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПІДВИЩЕНОЇ ТОЧНОСТІ

05.13.08-обчислювальні машини, системи та мережі, елементи і  
пристрої обчислювальної техніки і систем керування.

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
технічних наук

ЛЬВІВ - 1997

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державній політехніці".

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00761088 (U)

Науковий керівник - кандидат технічних наук

доцент Мичуда З.Р.

Офіційні опоненти:

1. Доктор технічних наук, професор Поджаренко В.О.
2. Кандидат технічних наук, доцент Кіселичник М.Д.

Провідна організація - Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут

Захист відбудеться "14" березня 1997 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 04.06.11 у Державному університеті "Львівська політехніка" (290646, Львів-13, вул. С.Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

Відгуки на автореферат у двох примірниках, завірені печаткою, просимо надсилати на адресу: 290646, Львів-13, вул. С.Бандери, 12, вченому секретарю ради Д 04.06.11.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного університету "Львівська політехніка" (вул. Професорська, 1).

Автореферат розіслано "12" лютого 1997 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради,  
к.т.н., с.н.с.

Луцик Я.Т.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. З розвитком комп'ютерних технологій та їх проникненням практично у всі сфери людської діяльності зростає і роль аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) як інтерфейса між джерелом інформації, що існує в аналоговій формі, і комп'ютерною системою, яка взагалі обробляє цифрові вхідні сигнали. З усього ряду існуючих на сьогодні АЦП необхідно виділити логарифмічні АЦП (ЛАЦП), широке застосування яких в різних галузях науки та техніки зумовлене тим, що дані перетворювачі мають набагато ширші функціональні можливості, ніж їх лінійні аналоги, зокрема забезпечують постійне значення відносної похибки в усьому діапазоні вимірювання, передачу цифровими методами неперервних сигналів з малим значенням пік-фактора (тобто великою імовірністю слабких сигналів), дозволяють краще і ефективніше вирішити низку таких задач як стискання динамічного діапазону, лінеаризація характеристик вимірювальних перетворювачів, виконання множення-ділення величин через додавання-віднімання їх логарифмів, тощо. Тому створення ЛАЦП підвищеної точності є своєчасним і актуальним.

Стан проблеми. Переважна більшість розроблених до цього часу логарифматорів та ЛАЦП на їх основі, - їх у світі понад 200, - реалізують або спосіб, що полягає у використанні природних характеристик  $p$ - $n$  переходу напівпровідникових діодів чи транзисторів, або - процесів при заряді-розряді RC-кола. Найкращі світові зразки логарифматорів, побудовані на основі вищезгаданих способів і виконані як інтегральні схеми фірмами Burr-Brown, Analog Devices і Intersil, забезпечують похибку перетворення не краще 0,5%. Дальше зменшення похибки перетворення обмежується наявністю низки недоліків (для логарифматорів на основі  $p$ - $n$  переходу напівпровідникових діодів чи транзисторів - це велика термозалежність, а для логарифматорів на основі розрядної RC-комірки - нижча ніж в попередніх логарифматорів точність перетворення при малому діапазоні вхідного сигналу) та технологією інтегральних схем, яка забезпечує ідентичність параметрів активних елементів в межах 0,1 - 5,0%.

На кафедрі "Автоматика та телемеханіка" Державного університету "Львівська політехніка" розроблено новий спосіб логарифмування, що базується на використанні процесів перерозподілу заряду конденсаторних кіл. Проте, хоча спосіб логарифмування з використанням перерозподілу заряду найбільш перспективний, на даний час він досліджений недостатньо, і безсумнівно актуальною є його дальша наукова розробка, - в першу чергу, з метою визначення граничної точності та створення на основі проведених досліджень нових логарифмічних АЦП підвищеної точності.

Мета роботи - раціональні шляхи побудови та розробка ЛАЦП з перерозподілом заряду (ПЗ) підвищеної точності на основі методів усунення впливу паразитних факторів на заряд в ємнісних комірках перетворювачів.

В основу розробки ЛАЦП з ПЗ покладені наступні вимоги:

1. Вхідний сигнал - напруга постійного струму.
2. Динамічний діапазон вхідних сигналів не менший 80 дБ (1 мВ - 10 В).
3. Відносна похибка перетворення з урахуванням похибки від неузгодження з функцією логарифму не більша 0,5%.
4. Час перетворення - не більше 100 мс.

Методи досліджень. В основу роботи покладені теоретичні дослідження технічних характеристик ЛАЦП з ПЗ та їх окремих вузлів з наступною експериментальною перевіркою і використанням результатів теоретичних досліджень при розробці конкретних пристроїв.

Наукова новизна. Вперше реалізовано ЛАЦП з ПЗ підвищеної точності, похибка перетворення якого не перевищує 0,5% в діапазоні вхідних сигналів 80дБ (1мВ-10В). Запропоновано методику оцінки точнісних характеристик ЛАЦП з ПЗ, що полягає в отриманні відповідних математичних моделей ємнісних комірок (ЄК) на основі принципу суперпозиції. На основі проведених досліджень встановлено, що основними паразитними факторами, що впливають на заряд в ЄК, є паразитні ємності затвор-канал та струми стоку (струми утічки) аналогових ключів на польових транзисторах, а також вхідний струм каскаду, що навантажує ЄК. На основі вищезгаданої методики розроблено ма-

тематичну модель ємнісної комірки ЛАЦП послідовної лічби з ПЗ для оцінки точнісних характеристик перетворювача; отримані рівняння функціональних залежностей логарифмічного перетворення з врахуванням впливу паразитних ємностей затвор-канал аналогових ключів на МОН-транзисторах, струмів утічки аналогових ключів на МОН-транзисторах; вхідного струму буфера ЄК та напруг зміщення компаратора та аналогових підсилювачів (буферів). Розроблено схеми ємнісних комірок ЛАЦП послідовної лічби з ПЗ, що дозволяють вимірювати додатні, від'ємні та знакозмінні напруги з показниково-спадною чи показниково-наростаючою розгортками. На основі запропонованих ємнісних комірок вперше отримано універсальну ємнісну комірку для логарифмічного АЦП послідовної лічби з перерозподілом заряду. Розроблено шляхи зменшення впливу паразитних факторів на заряд в ємнісних комірках, зокрема розроблено схему компенсації паразитного впливу струмів утічки аналогових ключів на заряд в ЄК. Удосконалено схеми компараторів та підсилювачів з періодичною компенсацією напруг зміщення на основі отриманих аналітичних виразів, що описують дані схеми в стані корекції та в стані вимірювання. Удосконалено аналогові ключі на КМОН-транзисторах з компенсацією зарядового впливу, які дозволяють суттєво зменшити розмір кристалу при реалізації ЛАЦП у вигляді інтегральної схеми за рахунок мінімізації впливу паразитних ємностей ключів на заряд в ЄК, а отже і за рахунок зменшення значень ємностей конденсаторів ЄК.

Особистий внесок. Основна частина теоретичних досліджень, всі експериментальні дослідження та висновки здійснені автором самостійно. Самостійно створено пакет програм для математичного моделювання ЛАЦП з ПЗ на основі виведених в співавторстві з доцентом Мичудою З.Р. рівнянь, що описують функціональну залежність логарифмічного перетворення з врахуванням впливу напруг зміщення компаратора та аналогових підсилювачів (буферів), паразитних ємностей затвор-канал аналогових ключів на МОН-транзисторах, струмів утічки аналогових ключів на МОН-транзисторах та вхідного струму буфера ЄК. Самостійно розроблено універсальну ЄК для ЛАЦП з ПЗ послі-

довної лічби, що дозволяє вимірювати додатні, від'ємні та знакозмінні напруги з показниково-спадною чи показниково-наростаючою розгортками.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблений ЛАЦП послідовної лічби з ПЗ, основна похибка якого з врахуванням похибки квантування не перевищує 0,5%, готовий до виконання у вигляді інтегральної схеми. Реалізація даного ЛАЦП з ПЗ в інтегральному виконанні дозволить додатково підвищити точність перетворення за рахунок мінімізації впливу некомпенсованих паразитних ємностей затвор-канал завдяки застосуванню збалансованих аналогових ключів на КМОН-транзисторах з компенсацією зарядового впливу.

Розроблений ЛАЦП використаний при розробці багатоканального вимірювального комплексу природного газу у Львівському центрі інституту космічних досліджень НАНУ та НКАУ.

На захист виносяться наступні основні положення дисертаційної роботи:

1. засоби зменшення паразитних впливів різних факторів на заряд в ЄК ЛАЦП, що дозволяють підняти точність логарифмічного аналого-цифрового перетворення;
2. методика оцінки точнісних характеристик ЛАЦП з ПЗ, що полягає в отриманні відповідних математичних моделей ємнісних комірок на основі принципу суперпозиції;
3. математична модель ЄК ЛАЦП з ПЗ послідовної лічби для оцінки розрахунковим шляхом точнісних характеристик ЛАЦП на основі рівнянь функціональної залежності логарифмічного перетворення з врахуванням впливу:
  - паразитних ємностей затвор-канал аналогових ключів на МОН-транзисторах;
  - струмів утічки аналогових ключів на МОН-транзисторах;
  - вхідного струму буфера ЄК;
  - напруг зміщення компаратора та аналогових підсилювачів (буферів);
4. результати розробки та експериментальних досліджень ЛАЦП з ПЗ підвищеної точності.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались на конференції "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах і конверсії виробництва" (м.Хмельницький, травень 1995 р.), на третій міжнародній науково-технічній конференції "Контроль і управління в технічних системах" (м.Вінниця, вересень 1995 р.), на другій українській конференції з автоматичного керування "Автоматика-95" (Львів, вересень 1995 р.), на міжнародній науково-технічній конференції "IMEKO TC-4 International Workshop on ADC MODELLING" (Смоленіце Касл, Словаччина, травень 1996 р.), на сьомій Українській конференції "Моделювання та дослідження стійкості систем" (м.Київ, травень 1996 р.), на третій Українській конференції з автоматичного управління "Автоматика-96" (м.Севастополь, вересень 1996 р.), на міжнародній конференції "ДРУКОТЕХН-96" (м. Львів, жовтень 1996 р.), на першій інтернаціональній школі моделювання (Алушта, Крим, осінь 1996 р.).

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, заключних висновків, списку літератури (76 найменувань), додатків та містить 195 сторінок, з яких машинописного тексту 137 сторінок, 39 сторінок з 63 рисунками, 2 сторінки з двома таблицями.

Публікації За матеріалами дисертації опубліковано 10 робіт.

## ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми, подано аналіз стану проблеми, сформульована мета роботи, коротко викладено зміст дисертації.

У першому розділі проведено огляд сучасного стану ЛАЦП, подана класифікація відомих логарифматорів та ЛАЦП на їх основі. Приводиться порівняльна характеристика існуючих ЛАЦП, серед яких найперспективнішими в плані точності перетворення, гнучкості, універсальності та можливості реалізації в інтегральному виконанні є ЛАЦП з ПЗ, блоки формування показникової функції (БФПФ) яких побудовані на основі пасивних ємнісних дільників та аналогових ключів. Кількість імпульсів на виході таких ЛАЦП пропорційна логарифму вхідної напруги згідно рівняння:

$$n = \frac{1}{\log \xi} \cdot \log \frac{U_{вх}}{U_0} \quad (1)$$

де  $U_0$  - значення напруги на виході джерела опорної напруги (ДОН);

$\xi$  - основа логарифму, причому:

$$\xi = \frac{C_n}{C_n + C_d} \quad (2)$$

Тут  $C_n$  - ємність накопичуючого конденсатора;

$C_d$  - ємність дозуючого конденсатора.

Існування логарифмічної залежності між кількістю імпульсів  $n$  та вхідним сигналом  $U_{вх}$  пояснюється тим, що при кожному ПЗ між накопичуючим та дозуючим конденсаторами ЄК (кількість ПЗ відповідає кількості поступлень імпульсів заданої частоти на лічильник результату) дозуючий конденсатор відбирає частину заряду накопичуючого конденсатора. В результаті напруга на накопичуючому конденсаторі  $U_n(n)$ , яка є вихідною напругою БФПФ, зменшується дискретними рівнями, сходинками:

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

$$\Delta U_n(n) = -U_0 \cdot \xi^{n-1} \cdot (1 - \xi) \quad (4)$$

де  $\Delta U_n(n)$  - приріст напруги на накопичуючому конденсаторі після дії  $n$ -го імпульсу заданої частоти.

В другому розділі приведені загальні принципи побудови ЛАЦП з ПЗ підвищеної точності. Суттєвою перевагою способу ПЗ є те, що вживання генератора з кварцевою стабілізацією є непотрібним, оскільки всі процеси в схемі проходять згідно закону експоненти. Завдяки цьому сформульовано умову, при виконанні якої можна вважати, що перехідні процеси (ПП) в ЄК закінчені і при цьому в загальну похибку перетворення не входить похибка внаслідок недозаряду конденсаторів ЄК  $\delta_{недоз}$ . Зокрема, для ЛАЦП послідовної лічби з ПЗ для виконання цієї умови необхідно, щоб модулі значення вільних складових для випадків заряду накопичуючого конденсатора  $C_n$   $\Delta U_3$ , перерозподілу

заряду  $\Delta U_{пз}$  та розряду дозуючого конденсатора  $C_d \Delta U_p$  на момент закінчення цих процесів не перевищували абсолютного значення одиниці молодшого розряду  $\Delta U_{nN_{max}}$ :

$$\Delta U(t_{дост}) < \Delta U_{nN_{max}}, \quad (5)$$

де  $t_{дост}$  - значення тривалостей процесів відповідно заряду накопичуючого конденсатора, ПЗ чи розряду дозуючого конденсатора, достатні для того, щоб виконувалась нерівність (5);

$N_{max}$  - максимальне число на виході ЛАЦП.

Загалом, така методика по уникненню похибки внаслідок недозаряду конденсаторів ЄК  $\delta_{недоз}$  справедлива для всіх типів ЛАЦП з ПЗ. На основі цих міркувань з нерівності (5) визначаються значення тривалостей процесів відповідно заряду накопичуючого конденсатора, ПЗ чи розряду дозуючого конденсатора, при яких похибкою  $\delta_{недоз}$  можна знехтувати. Звідси визначається час перетворення ЛАЦП.

Розроблено методику отримання функцій перетворення для різних варіантів ЄК на основі аналізу принципів побудови ємнісних комірок ЛАЦП з ПЗ, яка ґрунтується на законі збереження заряду і є справедлива для всіх типів ЛАЦП з ПЗ.

Розроблено ємнісну комірку, яка в складі ЛАЦП послідовної лічби з ПЗ дозволяє вимірювати від'ємні напруги з показниково-наростаючою вихідною розгорткою. Розроблено також ряд ємнісних комірок, які дозволяють вимірювати додатні, від'ємні та знакозмінні напруги з показниково-спадною чи показниково-наростаючою вихідними розгортками. На основі цих ємнісних комірок можна реалізувати нелінійні АЦП послідовної лічби з ПЗ.

Показано, що всі розроблені ємнісні комірки мають подібну будову та алгоритм функціонування. В результаті на базі цих комірок розроблено універсальну ємнісну комірку, яка увібрала в себе всі відомі до цього часу та розроблені ємнісні комірки. Універсальність її підтверджується простотою реалізації, простим алгоритмом функціонування, можливістю програмним чином міняти

функцію перетворення, а повторюваність її внутрішньої будови дозволяє легко реалізувати її у вигляді інтегральної мікросхеми.

Відомо, що процес порівняння напруг є визначальним для аналого-цифрового перетворення і є одним з основних джерел похибок перетворення. На відміну від лінійних АЦП, в яких напруга зміщення компаратора є похибкою, наслідком якої в лінійному АЦП є зсув в отриманому коді на виході, в ЛАЦП внаслідок нерівномірності значень сходинок вихідної розгортки БФПФ цей тип похибки має більше значення на початку діапазону при вимірюванні малих напруг через особливості функції логарифму.

На основі проведеного аналізу компараторів встановлено, що існуючі на сьогодні інтегральні компаратори не придатні для процесу порівняння напруг при логарифмічному аналого-цифровому перетворенні через особливість функції логарифму. З метою уникнення впливу похибки компаратора на точність перетворення запропоновано двокаскадний компаратор, першим каскадом якого є операційний підсилювач (ОП) в компараторному включенні, обидва входи якого забуферовані ОП, охопленими стопроцентним від'ємним зворотнім зв'язком, причому всі три ОП мають періодичну корекцію напруг зміщення. Другим каскадом двокаскадного компаратора є звичайний інтегральний компаратор.

Показано, що для запропонованого двокаскадного компаратора похибка, спричинена напругою зміщення, складається з відповідних похибок, спричинених напругами зміщення компаратора та буферів на його входах, і можна стверджувати, що існує сумарна напруга зміщення, рівна алгебраїчній сумі складових напруг зміщення.

Для запропонованого компаратора та підсилювачів (буферів) з періодичною корекцією напруги зміщення одержано рівняння, що описують їх стани в режимах корекції та вимірювання.

На основі експериментального дослідження запропонованого компаратора встановлено, що через наявність паразитних впливів аналогових ключів на заряди допоміжних конденсаторів при їх переключеннях в колах корекції напруг

зміщення відповідних каскадів на ОП найбільше значення похибки схем з періодичними корекціями виникає в момент переходу з такту корекції на такт вимірювання, коли відбувається спотворення напруг, записаних на конденсаторах під час такту корекції. Внаслідок цього проведено оптимізацію схеми компаратора та буферів з періодичною компенсацією, що полягає в застосуванні додаткових формувачів напруг управління ключами в колах корекції напруг зміщення каскадів на ОП.

Третій розділ дисертації присвячений математичному моделюванню ЛАЦП з ПЗ. Тут розглянуто запропоновану методику оцінки точнісних характеристик ЛАЦП з ПЗ, що полягає в отриманні на основі принципу суперпозиції відповідних математичних моделей ЄК, що входять до складу ЛАЦП з ПЗ, промодельовано вплив усіх встановлених паразитних факторів на заряд в ЄК, а також промодельовано вплив напруг зміщення компаратора та аналогових підсилювачів (буферів) на чутливість ЛАЦП.

Показано, що хоч ємнісні комірки ЛАЦП можна віднести до класу схем з переключними конденсаторами, в яких з метою мінімізації паразитних впливів усі вуз ли схеми з'єднуються через ключі з низькоімпедансними точками, через особливості функції логарифму в комірках присутні високоімпедансні вузли, що загострює проблему підвищення точності перетворення ЛАЦП. Тому актуальним є розробка методики оцінки точнісних характеристик ЛАЦП з ПЗ та створення на її основі математичних моделей, що описують відповідні ємнісні комірки з врахуванням впливу усіх паразитних чинників.

Встановлено, що основними паразитними факторами, що впливають на заряд в ЄК, є паразитні ємності та струми утечки аналогових ключів на польових транзисторах, вхідний струм каскаду, що навантажує ЄК, та неідеальність самих конденсаторів ЄК (діелектрична абсорбція, опір утечки, ненульовий ТКЄ).

Показано, що паразитні ємності затвор - канал аналогових ключів при переключенні спричиняють проникання заряду з кола управління в сигнальне коло і вплив цього заряду на точність перетворення є домінуючим. Паразитні ємності стік - витік аналогових ключів ведуть до зниження швидкодії ЛАЦП та

до зниження опору ключів в розімкненому стані. Зниження опору ключів, в свою чергу, також приводить до значного погіршення точності перетворення. Впливи усіх інших паразитних ємностей, присутніх в схемі ЛАЦП, є значно менші від ційно вказаних, тому у створеній математичній моделі вони не враховувалися.

Встановлено, що для мінімізації впливу паразитних ємностей затвор-канал аналогових ключів на заряд на конденсаторі необхідно, щоб виконувалось наступне:

- а) якщо обидві обкладки конденсатора є переключними і відключаються від низькоімпедансної точки, то кількість під'єднаних ключів з однаковим станом переходу з включеного стану у виключений, або навпаки, повинна бути однаковою з обох сторін конденсатора;
- б) якщо одна обкладка конденсатора є непереключною, тобто є заземлена, то для компенсації впливу паразитних ємностей основних ключів, під'єднаних до другої обкладки, необхідно, щоб кількість ключів, які замикаються, дорівнювала кількості ключів, які розмикаються. Якщо такої рівності немає, то для її досягнення вводяться додаткові компенсуючі короткозамкнуті ключі з вдвічі вужчим каналом, що працюють інверсно до тих ключів, паразитні ємності яких треба скомпенсувати.

Згідно запропонованої методики оцінки точнісних характеристик розробленого ряд ємнісних комірок ЛАЦП послідовної лічби з ПЗ, з яких, на основі їх математичних моделей, що описуються отриманими згідно принципу суперпозиції рівняннями функціональної залежності логарифмічного перетворення з врахуванням впливу паразитних факторів, вибрана ЄК, яка згідно її математичної моделі зазнає найменшого впливу паразитних факторів на заряд в ЄК. Так, отримане рівняння функціональної залежності логарифмічного перетворення з врахуванням впливу паразитних ємностей затвор - канал аналогових ключів на МОН- чи КМОН-транзисторах, що є аналогом рівняння (3), має вигляд:

$$U_{n(n)} = U_0 \cdot \alpha^n + \beta \quad , \quad (6)$$

де  $\alpha$  та  $\beta$  - коефіцієнти:

$$\alpha = \frac{C_n + 2 \cdot C_n}{C_n + C_d + 4 \cdot C_n}, \quad (7)$$

$$\beta = \frac{C_n}{C_n + 2 \cdot C_n} + (U_{\text{вкл}} - U_{\text{окл}}) \quad (8)$$

Тут  $C_{\Pi}$  - величина паразитних ємностей затвор-канал аналогових ключів;

$U_{\text{вкл}}$  та  $U_{\text{вкл}}$  - напруги на затворах відповідно розімкнутих чи замкнутих транзисторів.

Для ключів на МОН-транзисторах  $C_{\Pi} = C_{3c} = C_{3в}$ ,  $C_{\Pi}$  лежить в діапазоні одиниці - десятки пікофарад, а для ключів на КМОН-транзисторах  $C_{\Pi} = \Delta C = C_{3c1} - C_{3c2} = C_{3в1} - C_{3в2}$ , - це величина некомпенсованих ємностей затвор-канал, що лежить в діапазоні соті долі - одиниці пікофарад.

Таким чином, на основі оцінки впливу паразитних ємностей затвор - канал проаналізовано ряд ємнісних комірок ЛАЦП, внаслідок чого встановлено, що через наявність високоімпедансних вузлів в схемі комірки введення додаткових компенсуючих ключів не зменшує, а навпаки, збільшує вплив паразитних ємностей на заряд. Це означає, що найкращим шляхом зменшення впливу паразитних ємностей на заряд в ємнісних комірках є використання добре збалансованих ключів на КМОН-транзисторах. Показано, що для значень конденсаторів ЄК  $C_n = 0,6784$  мкФ,  $C_d = 0,685$  нФ та значень паразитних ємностей затвор - канал  $C_{\Pi} = 6$  пФ;  $1$  пФ та  $0,1$  пФ максимальні відхилення від ідеального значення вихідної розгортки ємнісної комірки ЛАЦП послідовної лічби з ПЗ будуть відповідно становити  $60$  мВ,  $10$  мВ та  $1$  мВ.

Для отримання рівняння функціональної залежності логарифмічного перетворення з врахуванням впливу струмів утечки аналогових ключів на МОН- чи КМОН-транзисторах для даної ЄК її стан розбивається на такти згідно з алгоритмом переключення ключів. Для кожного такту є справедлива система рівнянь, що побудована на основі еквівалентної схеми ЄК, в якій аналогові ключі

замінюються еквівалентними опорами в розімкнутому стані. В ці системи рівнянь для кожного такту входять рівняння згідно першого та другого законів Кірхгофа та рівняння виду:

$$\Delta U_C = \frac{t \cdot i_S}{C}, \quad (9)$$

де  $\Delta U_C$  - приріст на конденсаторі (накопичуючому чи дозуючому), що відбувся протягом існування певного такту тривалістю  $t$ ;

$i_S$  - сумарні струми утічки в вузлі, до якого підключений конденсатор  $C$  (відповідно дозуючий чи накопичуючий).

Тоді, напруга на  $i$ -му такті на будь-якому конденсаторі  $EC$   $U_{Ci}$  буде рівною:

$$U_{Ci} = U_{Ci-1} + \Delta U_{Ci-1}, \quad (10)$$

де  $U_{Ci-1}$  - напруга на конденсаторі на початку  $(i-1)$ -го такту;

$\Delta U_{Ci-1}$  - приріст напруги на конденсаторі під час  $(i-1)$ -го такту.

Оскільки вплив вхідного струму каскаду, що навантажує  $EC$ , тобто буфера  $EC$ , аналогічний впливу струмів утічки аналогових ключів на заряд в  $EC$ , то для отримання рівняння функціональної залежності логарифмічного перетворення з врахуванням цього впливу залишається в силі розбиття стану схеми  $EC$  на такти згідно з алгоритмом переключення ключів, кожен з яких описується системою рівнянь, в яку входять рівняння згідно першого та другого законів Кірхгофа та рівняння виду (9) та (10).

Сутність математичного моделювання впливу напруг зміщення компаратора та буферів на чутливість ЛАЦП полягає в тому, що порівнюються значення чисел на виході ЛАЦП згідно рівнянь (1) та (11) для всього діапазону вхідних напруг - від значення опорної напруги  $U_0 = U_{VXmax} = 10V$  до значення напруги  $U_{VXmin} = 1mV$ :

$$n = \frac{1}{\log \xi} \cdot \log \left( \frac{U_{vx} \pm U_{змсум}}{U_0} \right) \quad (11)$$

У випадку, якщо різниця між числами на виході ЛАЦП, що являє собою відхилення вихідного коду, отриманими згідно рівнянь (1) та (11), не перевищує

значення  $\pm 1$ , похибкою компаратора  $\delta_{\text{комп}}$  можна знехтувати. В іншому випадку ця похибка погіршує точність перетворення.

На основі проведеного математичного моделювання впливу напруг зміщення компаратора та буферів на чутливість ЛАЦП згідно рівнянь (1) та (11) встановлено, що для забезпечення вхідного динамічного діапазону у 80 дБ в ЛАЦП необхідно застосувати компаратор та буфери, сумарна напруга зміщення яких  $U_{\text{змсум}}$  не перевищує  $\pm 1 \text{ мкВ}$ .

Четвертий розділ присвячений фізичному моделюванню ЛАЦП. Оскільки на сьогодні не існує жодного стандарту на нелінійні чи, зокрема, логарифмічні АЦП по оцінці похибок їх перетворення, то запропоновано оцінювати відхилення вихідної розгортки БФПФ від ідеального значення цієї розгортки, спричинене впливом усіх паразитних чинників в сукупності, похибкою від неузгодження з функцією логарифму  $\delta_{\text{LOG}}$ , що являє собою максимальне відхилення модуля сумарної кривої відхилення вихідної розгортки  $\epsilon_K dU_{t\text{max}}$  від максимально можливого значення цього відхилення по модулю  $dU_{\text{max}}$  (допустимі флуктуації напруги в межах кожної з  $n$  сходинок вихідної розгортки, де  $n$  пробігає всі значення від нуля до  $N_{\text{max}}$ ), приведене до максимального значення вхідної вимірюваної напруги  $U_{\text{вхmax}}=U_0$ :

$$\delta_{\text{LOG}} = \frac{dU_{t\text{max}} - dU_{\text{max}}}{U_0} \cdot 100\% \quad (12)$$

Загалом, основна похибка перетворення ЛАЦП з ПЗ не перевищує значення:

$$\delta = \delta_{\text{LOG}} + \delta_{\text{д}} = \delta_{U_0} + \delta_{\text{осн}} + \delta_{\text{комт}} + \delta_{\text{недоз}} + \delta_{\text{параз}} + \delta_{\text{д}} \quad , \quad (13)$$

де  $\delta_{U_0}$  - похибка, спричинена зміною опорної напруги  $U_0$ ;  $\delta_{\text{осн}}$  - похибка від розузгодження основи логарифму  $\xi$ ;  $\delta_{\text{комт}}$  - похибка від нечутливості компаратора, спричинена наявністю напруги зміщення компаратора;  $\delta_{\text{недоз}}$  - похибка

внаслідок недозаряду конденсаторів ЄК;  $\delta_{\text{параз}}$  - похибка, спричинена наявністю впливу паразитних факторів на заряд в ЄК;  $\delta_{\text{д}}$  - похибка квантування.

Якщо значення сумарної напруги зміщення компаратора та буферів  $U_{\text{змсум}}$  не перевищує  $\pm 1\text{мВ}$ , а також виконується нерівність (5), то складовими  $\delta_{\text{комп}}$  та  $\delta_{\text{недоз}}$  можна знехтувати.

На основі експериментальних досліджень показано, що для відомих до цього часу ЛАЦП з ПЗ основна похибка перетворення була більшою 0,5% через наявність похибки  $\delta_{\text{параз}}$ , спричиненої впливами на заряд в ЄК паразитних ємностей затвор-канал та струмів утічки аналогових ключів на МОН- чи КМОН-транзисторах, а також вхідного струму буфера ЄК. Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що при великих значеннях вимірюваної напруги  $U_{\text{вх}}$  зниження точності перетворення, яке характеризується абсолютним відхиленням вихідної розгортки ЄК від ідеального значення цієї розгортки (див. рис. 1), відбувається за рахунок впливу паразитних ємностей ключів, в той час як при малих значеннях напруги  $U_{\text{вх}}$  домінуючим фактором зниження точності перетворення є вплив струмів утічки ключів (а саме вплив струму утічки через ключ, включений між джерелом опорної напруги та накопичуючим конденсатором). Причому наслідком останнього впливу є суттєве звуження динамічного діапазону. Для аналізованого випадку напруга на виході ЄК при вимірюванні малих значень вхідної напруги досягала значення 9,618мВ, що означає звуження діапазону вхідних напруг майже на 20дБ.

Показано, що найефективніший шлях зменшення впливу паразитних факторів на заряд в ЄК полягає в компенсації паразитних ємностей аналогових ключів за рахунок використання добре збалансованих аналогових КМОН-ключів, зменшенні вхідного струму буфера за рахунок застосування ОП з малим вхідним струмом (ОП ОРА111В фірми Vugt-Brown з  $I_{\text{вх}} < 1\text{пА}$ ), компенсації впливу струмів утічки аналогових ключів завдяки застосуванню розробленої схеми компенсації впливу струмів утічки. На рис.2 приведена функціональна схема

ЛАЦП послідовної лічби з ПЗ, особливістю якої є ЄК зі схемою компенсації струму утічки аналогових ключів.

Розроблена схема компенсації струму утічки дозволяє зменшити струм утічки  $I_1$  щонайменше на чотири порядки, що дозволить звести струми утічки аналогових ключів в даній схемі ЄК до долей пікоампер. В цьому випадку струми утічки ключів стають по значенню одного порядку зі струмами утічки самих конденсаторів ЄК. На рис.3 приведено графік абсолютного відхилення вихідної розгортки ємнісної комірки, приведеної в складі ЛАЦП на рис.2, від ідеального значення цієї розгортки, з якого видно, що відхилення вихідної розгортки БФПФ внаслідок впливу струмів утічки аналогових ключів практично зведені до нуля.

Приведений опис розширеної функціональної схеми оптимізованого ЛАЦП з ПЗ підвищеної точності, аналіз помилок перетворення та рекомендації по використанню.

Обґрунтованість та вірогідність наукових результатів забезпечується коректністю виконаних експериментів і розрахунків, і підтверджується малими значеннями розбіжностей між результатами теоретичного аналізу та експериментальних досліджень (розбіжність результатів менша 10%). На основі проведених досліджень:

- встановлено наступні значення факторів паразитного впливу для оптимізованого варіанту ЛАЦП з ПЗ підвищеної точності: для аналогових ключів на МОН-транзисторах типу КП304 максимальне значення паразитних ємностей затвор-канал  $C_{п} = 6\text{пФ}$ , типові значення  $C_{п} = 4\text{пФ}$ , значення вхідного струму буфера ЄК на ОП 140УД23  $I_{вх} < 1\text{нА}$ . Для випадку  $C_{п} = 6\text{пФ}$  похибка від неузгодження з функцією логарифму  $\delta_{\text{LOG}} < 0,6\%$ , для випадку  $C_{п} = 4\text{пФ}$   $\delta_{\text{LOG}} < 0,4\%$  (див. рис.3). Таким чином, для розробленого ЛАЦП похибка перетворення забезпечується на рівні кращих світових аналогів (основна похибка перетворення не перевищує 0,5%);

- встановлено, що при використанні ключів на КМОН-транзисторах зі значеннями факторів паразитного впливу  $C_{п1}=1\text{пФ}$ ,  $C_{п2}=0,1\text{пФ}$  та  $C_{п3}=0,01\text{пФ}$  ( $I_{вх}=1\text{пА}$  для буфера ЄК на ОП ОРА111В), похибки від неузгодження з функцією логарифму оптимізованого варіанту ЛАЦП з ПЗ не перевищують відповідно значень  $\delta_{\text{LOG}} < 0,1\%$  (див.рис.4),  $\delta_{\text{LOG}} < 3,5 \cdot 10^{-4}\%$  та  $\delta_{\text{LOG}} \approx 0$  (див.рис.5).

У випадку застосування ключів на МОН-транзисторах типу КР304 максимальний час перетворення розробленого ЛАЦП послідовної лічби з ПЗ менший 1с (при тактовій частоті ГТІ рівній приблизно 10кГц). При цьому, основна похибка перетворення не перевищує значення 0,5%. У випадку ж застосування ключів на збалансованих КМОН-транзисторах (значення  $C_{п} < 0,1\text{пФ}$ ) при тій самій точності перетворення час перетворення такого ЛАЦП не перевищуватиме десятків мілісекунд.

### ОСНОВНІ ВИСНОВКИ РОБОТИ

1. Вперше отримано ЛАЦП з ПЗ, похибка перетворення якого не перевищує 0,5% в діапазоні вхідних сигналів 80 дБ (1 мВ - 10 В).
2. Запропоновано методику отримання функцій перетворення для різних варіантів ЄК на основі аналізу принципів побудови ємнісних комірок ЛАЦП з перерозподілом заряду, яка ґрунтується на законі збереження заряду і є справедлива для всіх типів ЛАЦП з перерозподілом заряду.
3. Запропоновано методику оцінки точнісних характеристик ЛАЦП з ПЗ, що полягає в отриманні відповідних математичних моделей ЄК на основі принципу суперпозиції.
4. Встановлено, що основними паразитними факторами, що впливають на заряд в ЄК є паразитні ємності затвор-канал та струми стоку (струми утічки) аналогових ключів на польових транзисторах, а також вхідний струм каскаду, що навантажує ЄК.
5. Розроблено шляхи зменшення впливу паразитних факторів на заряд в ЄК, що дозволило підвищити точність перетворення. По результатах фізичного та

математичного моделювань розроблено схему компенсації паразитного впливу струмів утічки аналогових ключів на заряд в ЄК.

6. Розроблено схеми ЄК для ЛАЦП з ПЗ послідовної лічби, що дозволяють вимірювати додатні, від'ємні та знакозмінні напруги з показниково-спадною чи показниково-наростаючою розгортками. На основі розроблених ЄК отримано універсальну ЄК для ЛАЦП з ПЗ послідовної лічби.

7. Отримані рівняння, що описують функціональну залежність логарифмічного перетворення з врахуванням впливу:

- напруг зміщення компаратора та аналогових підсилювачів (буферів);
- паразитних ємностей затвор-канал аналогових ключів на МОН-транзисторах;
- струмів утічки аналогових ключів на МОН-транзисторах;
- вхідного струму буфера ЄК.

8. Створено математичну модель ЄК для ЛАЦП з ПЗ послідовної лічби, яка дозволяє оцінювати точнісні характеристики ЛАЦП на основі виведених рівнянь функціональної залежності логарифмічного перетворення з врахуванням впливу різних паразитних факторів на заряд в ЄК.

9. Удосконалено схеми компараторів та підсилювачів з періодичною компенсацією напруг зміщення на основі отриманих аналітичних виразів, що описують дані схеми в стані корекції та в стані вимірювання.

10. Удосконалено аналогові ключі на КМОН-транзисторах з компенсацією зарядового впливу на основі фізичного та математичного моделювань, які дозволять суттєво зменшити розмір кристалу при реалізації ЛАЦП у вигляді інтегральної схеми за рахунок мінімізації впливу паразитних ємностей ключів на заряд в ЄК, а отже і за рахунок зменшення значень ємностей конденсаторів ЄК.

11. Створено пакет програм для математичного моделювання ЛАЦП з ПЗ на основі отриманих рівнянь, що описують функціональну залежність логарифмічного перетворення з врахуванням впливу напруг зміщення компаратора та аналогових підсилювачів (буферів), паразитних ємностей затвор-канал

аналогових ключів на МОН-транзисторах, струмів утічки аналогових ключів на МОН-транзисторах та вхідного струму буфера ЄК.

12. Результати досліджень та розробок впроваджені у вигляді ЛАЦП послідовної лічби з ПЗ у Львівському центрі інституту космічних досліджень НАНУ та НКАУ з метою використання цього перетворювача при розробці багатоканального вимірювального комплексу природного газу.

### СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

1. Піскозуб А.З. Особливості роботи аналогових ключів на ємнісне навантаження//Вісник Державного університету "Львівська політехніка "Автоматика, вимірювання та керування", № 305, 1996, С. 61-67.
2. Mychuda Z.R., Piskozub A.Z. A charge redistribution logarithmic analog-to-digital converters modelling // Proceedings of IMEKO TC-4 International Workshop on ADC MODELLING.- Smolenice Castle (Slovak Republic).- 1996, pp.100-105.
3. Піскозуб А.З. Логарифмічні АЦП з перерозподілом заряду для вимірювання напруг різних знаків // Праці міжнародної конференції "Комп'ютерні технології друкарства: алгоритми, сигнали, системи (ДРУКОТЕХН-96)".- Львів, 1996.- С.86-89.
4. Піскозуб А.З. Математичне та фізичне моделювання логарифмічних АЦП підвищеної точності на основі перерозподілу заряду //Там же.- С.89-91.
5. Mychuda Z.R., Piskozub A.Z. The improvement of conversion accuracy of charge redistribution logarithmic ADC // Proceedings of 1-st International Modelling School.-Крым Autumn'96.-Alushta, 1996, p.85.
6. Мичуда З.Р., Піскозуб А.З. Особливості реалізації логарифмічних аналого-цифрових перетворювачів послідовної лічби з перерозподілом заряду //Друга Українська конференція з автоматичного керування ("Автоматика-95").- Праці, т.4.- Львів: НВЦ "ІТІС", 1995.- С. 119-120.
7. Піскозуб А.З. Моделювання логарифмічних АЦП з перерозподілом заряду з показниково-наростаючою розгорткою //Третя українська конференція з автоматичного керування ("Автоматика-96").-Праці, т.1.- Севастополь: СевГТУ, 1996.-С.218.

8. Піскозуб А.З. Логарифмічний аналого-цифровий перетворювач з перерозподілом заряду/Тези доповіді//Конференція "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах і конверсії виробництва".- Хмельницький, 1995. - С.32.
9. Мичуда З.Р., Піскозуб А.З. Підвищення точності логарифмічних аналого-цифрових перетворювачів з перерозподілом заряду / 3-я міжнародна науково-технічна конференція "Контроль і управління в технічних системах"// Тези доповідей.- ч.2.- Вінниця, 1995.- С.267.
10. Мичуда З.Р., Піскозуб А.З. Математичне моделювання процесів перерозподілу заряду в ємнісних комірках логарифмічних АЦП/Тези доповідей // 7-ма Українська конференція "Моделювання та дослідження стійкості систем".- Київ, 1996.- С.102.

#### АННОТАЦІЯ

Піскозуб А.З. Логарифмічні аналого-цифрові преобразувачі підвищеної точності.- Рукопис.

Дисертація на соискання ученої ступені кандидата технічних наук по спеціальності 05.13.08 - вычислительные машины, системы и сети, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления.- Государственный университет "Львовская политехника", Львов, 1997.

Целью диссертационной работы являются рациональные пути построения и разработка логарифмических аналого-цифровых преобразователей повышенной точности с перераспределением заряда (основная погрешность преобразования с учётом погрешности квантования не превышает 0,5%) на основании методов устранения влияния паразитных факторов на заряд в ёмкостных ячейках преобразователей.

Защищается 10 научных работ, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований логарифмических аналого-цифровых преобразователей повышенной точности с перераспределением заряда. Предложена методика оценки точностных характеристик данных преобразователей, которая состоит в получении соответствующих математических моделей

ёмкостных ячеек на основании принципа суперпозиции. На основании данной методики получена математическая модель ёмкостной ячейки логарифмического аналого-цифрового преобразователя последовательного счёта с перераспределением заряда повышенной точности, описываемая уравнениями функциональной зависимости логарифмического преобразования с учётом влияния паразитных факторов на заряд в ёмкостной ячейке.

Разработанный логарифмический аналого-цифровой преобразователь последовательного счёта с перераспределением заряда использован при разработке многоканального измерительного комплекса природного газа во Львовском центре института космических исследований НАНУ и НКАУ.

Piskozub A.Z. High accuracy logarithmic analog-to-digital converters.- Manuscript. Thesis for a Candidate of Science degree in speciality 05.13.08 -computers, systems and networks, elements and devices of computing technique and control systems.- State University "Lvivska Polytechnica", Lviv, 1997.

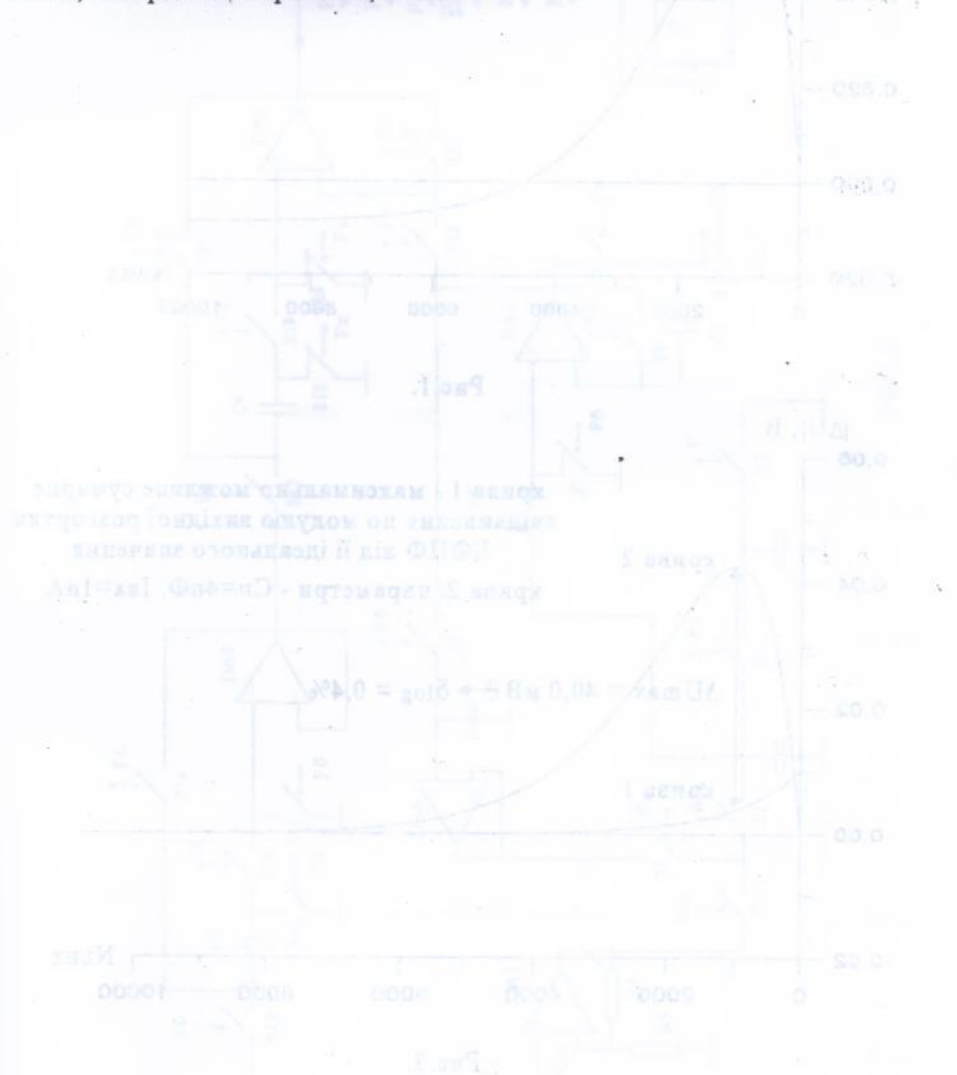
The aims of the given thesis are the rational construction ways and development of high accuracy charge redistribution logarithmic analog-to-digital converters (the main conversion error with the consideration of quantization error does not exceed 0,5%) on the basis of methods of elimination of parasitic factors influence over the charge in capacitor cells of the logarithmic analog-to-digital converters.

10 scientific publications, which contain theoretical and experimental results of high accuracy charge redistribution logarithmic analog-to-digital converters research, are defended.

There has been suggested the evaluation method of the converters accuracy characteristics, which consists in obtaining the corresponding mathematical models of capacitor cells on the basis of superposition principle. On the basis of this method there has been carried out the mathematical model of the capacitor cell of the high accuracy charge redistribution serial logarithmic analog-to-digital converter. This mathematical model is described by conversion functions with the consideration of parasitic factors influence over the charge in capacitor cell.

The worked out charge redistribution serial logarithmic analog-to-digital converter has been used in the development of multichannel natural gas measuring complex in Lviv centre of institute of cosmic researches.

Ключові слова: логарифмічний аналого-цифровий перетворювач, перерозподіл заряду, схеми з переключними конденсаторами, математичне моделювання, інтегральна мікросхема, аналіз.



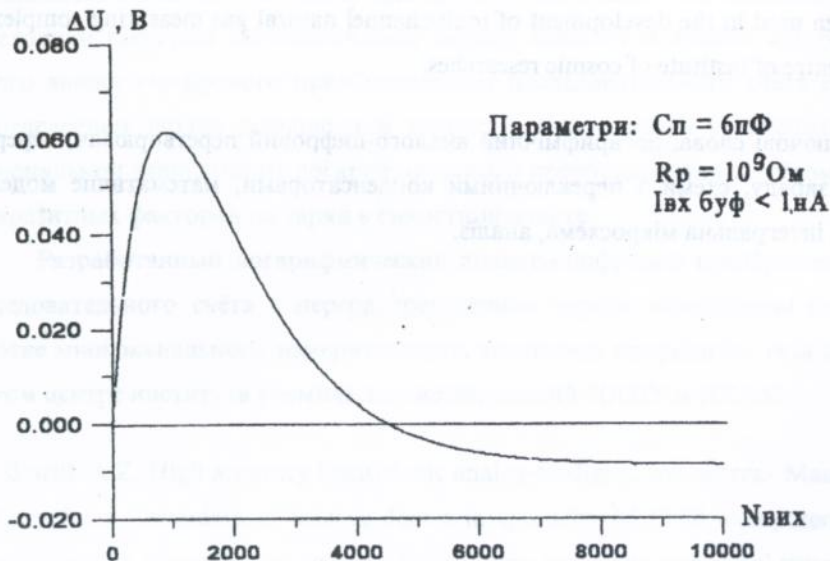


Рис.1.

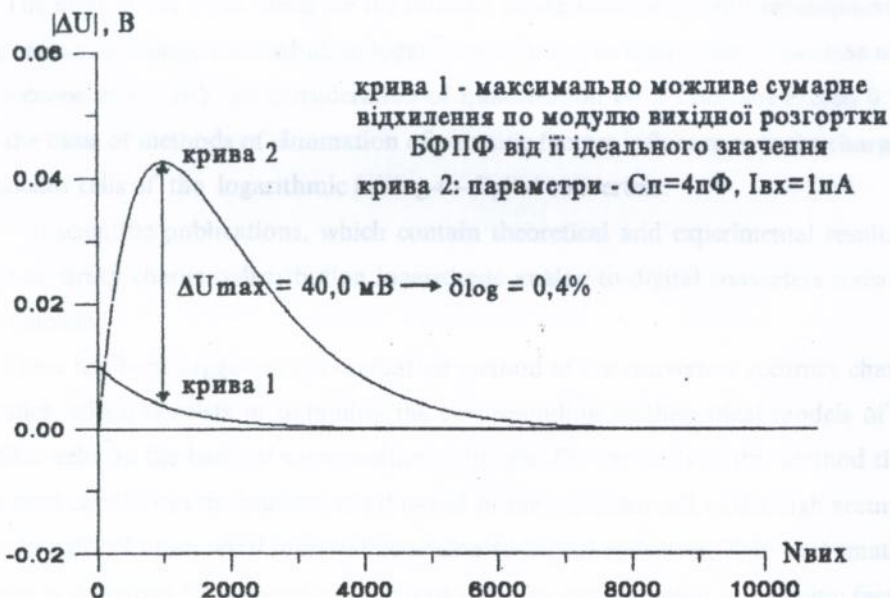


Рис.3.

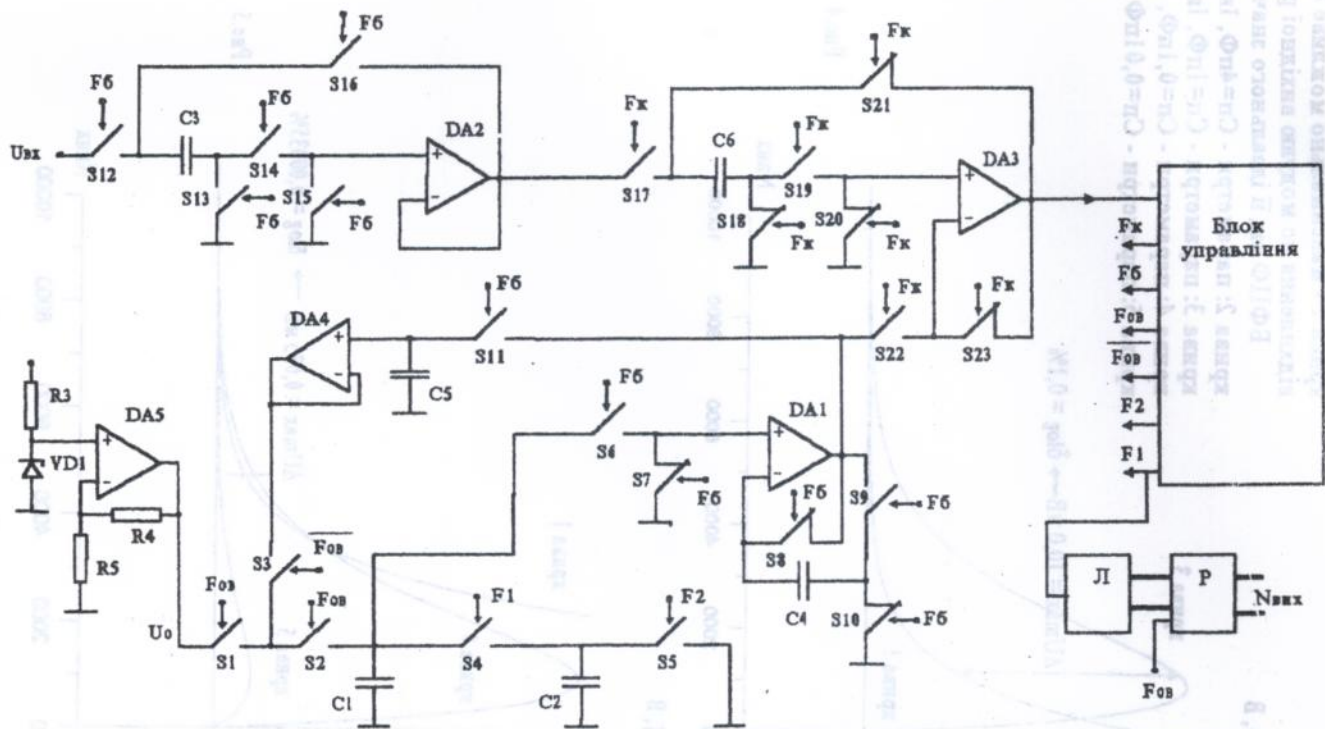


РИС.2

крива 1 - максимально можливе сумарне відхилення по модулю вихідної розгортки

БФПФ від її ідеального значення

крива 2: параметри -  $C_p=4\text{пФ}$ ,  $I_{вх}=1\text{пА}$

крива 3: параметри -  $C_p=1\text{пФ}$ ,  $I_{вх}=1\text{пА}$

крива 4: параметри -  $C_p=0,1\text{пФ}$ ,  $I_{вх}=1\text{пА}$

крива 5: параметри -  $C_p=0,01\text{пФ}$ ,  $I_{вх}=1\text{пА}$

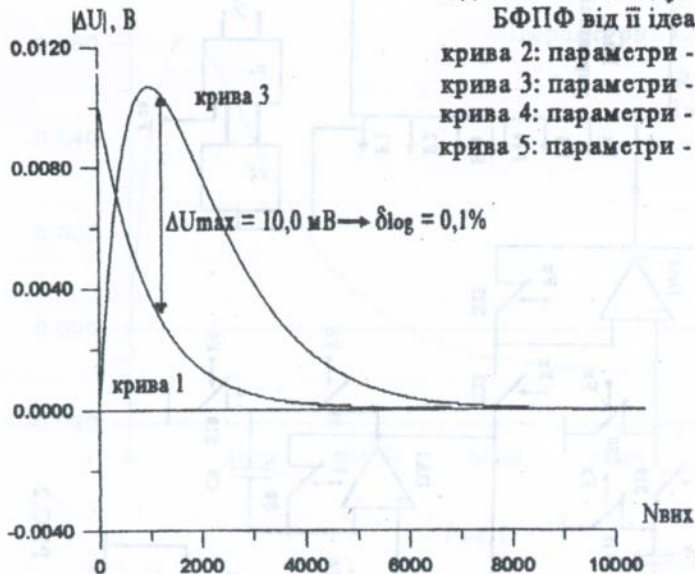


Рис.4

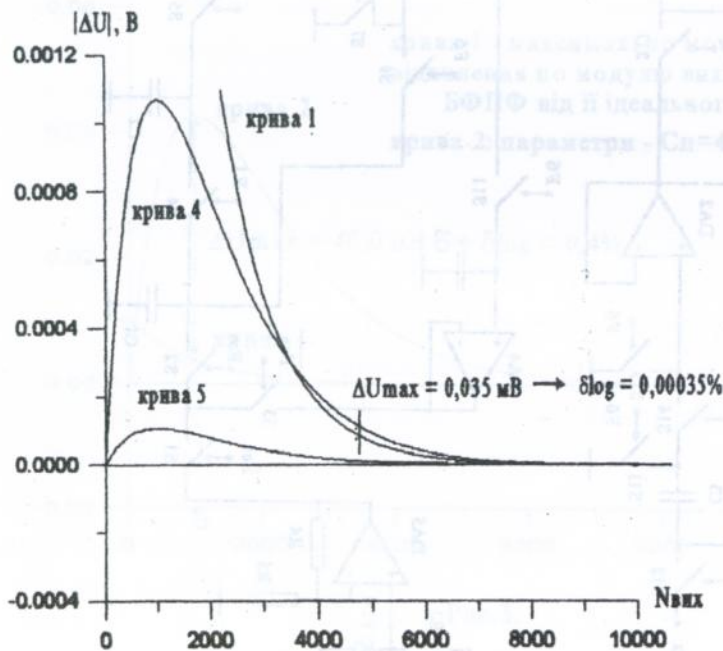


Рис.5



АВ 36.937

Підписано до друку 06.02.97 р. Формат 60x84/16.

Обсяг 1 друк. лист. Зам. *484*. Тир 100.

Львів. Виробничо - комерційне підприємство «ВМС».