

Вінницький національний технічний університет

Решетнік Олександр Олександрович

УДК 681.335

**ВИСОКОПРОДУКТИВНІ АЦП ІЗ ЗМІННИМИ ТРИВАЛОСТЯМИ ТАКТІВ
ПОРОЗРЯДНОГО НАБЛИЖЕННЯ З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ**

Спеціальність 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2011

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор,
Заслужений працівник освіти України
Азаров Олексій Дмитрович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри обчислювальної техніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, с. н. с.
Багацький Валентин Олексійович,
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, провідний
науковий співробітник відділу перетворювачів форми інформації, м.
Київ

доктор технічних наук, професор
Мичуда Зиновій Романович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри комп'ютеризованих систем автоматички

Захист відбудеться «15» квітня 2011 р. о 9:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

Із дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розіслано «11» березня 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С. М. Захарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У рамках існуючих типів перетворювачів форми інформації (ПФІ), аналого-цифрові перетворювачі порозрядного наближення становлять значну питому вагу (близько 40%) серед сучасних типів АЦП. Їх зазвичай класифікують як пристрої загального використання. Вони мають переважно середню швидкодію, невеличкі апаратні витрати і забезпечують досить високу роздільну здатність на рівні 14–18 розрядів.

Використання вагової надлишковості у вигляді систем числення з ваговою надлишковістю (СЧВН) дає можливість значного (на порядок і більше) підвищення продуктивності порозрядного аналого-цифрового перетворення за рахунок компенсації динамічних похибок першого і другого роду, що виникають у процесі врівноваження вхідного аналогового сигналу компенсуючим сигналом АЦП. Це дозволяє організувати процес врівноваження зі змінними тривалостями тактів і зменшити час перетворення, у цілому.

Відомі методи підвищення швидкодії та точності порозрядного аналого-цифрового врівноваження з постійними тривалостями тактів на основі вагової надлишковості дозволяють значно покращити характеристики перетворення порівняно із класичним двійковим перетворенням. Водночас, відомі підходи до підвищення швидкодії двійкових АЦП порозрядного врівноваження на основі застосування змінних тривалостей тактів описані в роботах Островерхова В. В. Проте вигреш від застосування запропонованих методів є незначним, до 20%. Використання змінних тривалостей тактів порозрядного наближення в процесі аналого-цифрового перетворення з ваговою надлишковістю дозволяє в декілька разів підвищити продуктивність процесу аналого-цифрового перетворення.

Загальні принципи побудови та покращення характеристик АЦП досліджувалися та розроблялися науковими школами колишнього СРСР, Росії, США та України. У ПФІ з ваговою надлишковістю та постійними тривалостями тактів врівноваження є можливість у комплексі разом із підтриманням точності на неточних елементах підвищувати швидкодію АЦП порозрядного кодування в 5–10 разів за рахунок компенсації динамічних похибок, що виникають під час врівноваження.

Створенням високопродуктивних порозрядних АЦП з ваговою надлишковістю з 70–х років минулого століття займається наукова школа професора О. Д. Азарова у Вінницькому національному технічному університеті.

Водночас, задача побудови АЦП зі змінними тривалостями тактів врівноваження вимагає використання схем порівняння струму з регульованою чутливістю. При цьому на старших тактах чутливість таких схем може бути низькою, а швидкодія – максимальною. Водночас на молодших тактах чутливість схеми повинна бути максимальною. Це стає можливим при використанні схеми порівняння струмів, реалізованої за спеціальною схемотехнікою. Таким чином, науково-технічна задача, пов'язана зі створенням нового класу високопродуктивних багаторозрядних АЦП із змінними тривалостями тактів порозрядного наближення з ваговою надлишковістю, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу було виконано відповідно до координаційного плану науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України (наказ №37 від 13.02.1997 р.) за напрямком “Перспективні інформаційні технології, прилади комплексної автоматизації, системи зв'язку”.

Дисертаційне дослідження здійснювалося здобувачем протягом 2006–2010 років відповідно до наукового напрямку кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету, зокрема, у ході виконання науково-дослідних програм «Розробка теорії швидкісного порозрядного аналого-цифрового перетворення на основі вагової надлишковості» (номер державної реєстрації 0105U002439), «Теорія побудови пристроїв та елементної бази прискореного високоточного аналого-цифрового перетворення» (номер державної реєстрації 0108U000664). Указані дослідження виконувалися також у рамках спільної науково-дослідної лабораторії відмовостійких інформаційно-обчислювальних і керуючих систем між Інститутом кібернетики імені

В.М. Глушкова НАН України та Вінницьким національним технічним університетом згідно договору №58/33.

Мета і завдання дослідження. Метою досліджень є підвищення продуктивності АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю за рахунок збільшення швидкодії при збереженні роздільної здатності шляхом задання змінних тривалостей тактів врівноваження, що скорочує час перетворення. У рамках вибраного напрямку здійснено постановку таких задач досліджень:

1. Дослідити та проаналізувати існуючі підходи щодо підвищення продуктивності АЦП порозрядного наближення. Запропонувати та проаналізувати метод підвищення продуктивності багаторозрядних АЦП із ваговою надлишковістю за рахунок збільшення швидкодії при збереженні роздільної здатності.

2. Удосконалити математичні моделі динамічних похибок АЦП на основі рівнянь балансу, що складаються за умови використання операції порівняння з регульованою чутливістю і відповідно враховують специфіку перехідних процесів під час формування компенсуючого сигналу при прискореному порозрядному врівноваженні з ваговою надлишковістю.

3. Проаналізувати умови формування нерозривної передатної характеристики порозрядного АЦП зі змінними тривалостями тактів врівноваження за умови наявності динамічних похибок першого роду. Оцінити ефективність запропонованого методу підвищення продуктивності АЦП.

4. Надати рекомендації щодо проектування високопродуктивних АЦП порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю зі змінними тривалостями тактів прискореного порозрядного наближення. Проаналізувати умови побудови ЦАП з нерозривною характеристикою перетворення і можливість застосування його в АЦП порозрядного наближення. Розробити програмне забезпечення для моделювання процесу прискореного аналого-цифрового перетворення із ваговою надлишковістю зі змінними тривалостями тактів порозрядного врівноваження.

5. Розробити та виготовити макет високопродуктивного АЦП порозрядного наближення зі змінними тривалостями тактів прискореного врівноваження з ваговою надлишковістю для систем аналізу звукових трактів.

Об'єктом дослідження є процес високопродуктивного прискореного аналого-цифрового перетворення з регульованою чутливістю операції порівняння значень аналогових сигналів та зі змінними тривалостями тактів порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю.

Предметом дослідження є динамічні похибки першого роду у високопродуктивному АЦП зі змінними, зокрема прогресуючими тривалостями тактів прискореного порозрядного наближення з ваговою надлишковістю.

Методи дослідження базуються на використанні: теорії аналого-цифрового перетворення з ваговою надлишковістю для побудови математичних моделей процесу врівноваження вхідного аналогового сигналу компенсуючим сигналом; теоретичних основ електронних схем для дослідження аналогових вузлів АЦП; теорії лінійних інтегральних схем для дослідження аналогових вузлів АЦП; теорії цифрових автоматів для синтезу схем керування та обчислення результату перетворення; теорії вимірювань для дослідження процесу перетворення; теорії ймовірності для дослідження похибки квантування при аналого-цифровому наближенні; математичного аналізу для аналізу математичних моделей; теорії об'єктно-орієнтованого програмування, паралельного програмування та теорії системного програмування для розробки програмного забезпечення для моделювання процесу аналого-цифрового перетворення.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Уперше запропоновано метод підвищення продуктивності багаторозрядних АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю шляхом підвищення швидкодії при збереженні роздільної здатності за рахунок застосування змінних тривалостей тактів

прискореного порозрядного врівноваження й автоматичного регулювання чутливості операції порівняння аналогових сигналів, що дозволяє скоротити загальний час перетворення.

2. Удосконалено математичні моделі статичних і динамічних похибок прискореного порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю на основі рівнянь балансу, під час складання яких враховано використання операції порівняння з регульованою чутливістю. Це дозволяє визначити оптимальний розподіл вагової надлишковості для компенсації статичних та динамічних похибок, що виникають під час порівняння значень вхідного та компенсуючого сигналів.

3. Удосконалено математичну модель перехідних процесів операції порівняння при прискореному порозрядному аналого-цифровому перетворенні з ваговою надлишковістю, у якій враховано змінення чутливості схеми порівняння під час врівноваження.

4. Подальшого розвитку отримав метод побудови ЦАП з ваговою надлишковістю для багаторозрядного АЦП шляхом уведення структурної надлишковості у вигляді декількох ненадлишкових двійкових ЦАП, що не вимагає створення оригінальної елементної бази.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що отримані теоретичні положення дозволили:

1. Запропонувати рекомендації щодо проектування високопродуктивних АЦП зі змінними тривалостями тактів прискореного порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю. При цьому можливо використовувати елементну базу середньої швидкодії.

2. Запропонувати рекомендації щодо побудови високопродуктивного порозрядного АЦП із ваговою надлишковістю за умови, що введення цієї надлишковості здійснюється шляхом використання ненадлишкових двійкових ЦАП. Це дозволяє уникнути використання спеціальної елементної бази для побудови АЦП із ваговою надлишковістю і застосовувати серійну існуючу елементну базу у вигляді двійкових ЦАП.

3. Розробити структурні, функціональні та принципові схеми АЦП із ваговою надлишковістю та змінними тривалостями тактів врівноваження, а також рекомендації щодо проектування вузлів аналогової частини такого АЦП, зокрема, підсилювачів, буферів та вхідних пристроїв порівняння струмів.

4. Розробити програмне забезпечення для моделювання процесу порозрядного аналого-цифрового перетворення з ваговою надлишковістю та змінними тривалостями тактів врівноваження за умови можливості варіювання параметрів перетворення і використання різних систем числення. Це дозволяє покращити процес проектування АЦП з ваговою надлишковістю.

5. Спроекувати та виготовити високопродуктивний АЦП зі змінними тривалостями тактів врівноваження, що використовується для підвищення точності і продуктивності вимірювальної системи аналізатора параметрів звукових трактів АПЗТ-02 (виробництва ВНТУ), який застосовується для контрольних вимірювань у супутниковому радіомовленні, та збільшення (у 2–4 рази) системної продуктивності дослідних зразків аналого-цифрових компонентів мікрохвильової інтегрованої телерадіоінформаційної системи МІТРИС.

Основні результати впроваджено на державному підприємстві «Укркосмос» (м. Київ); Інституті електроніки і зв'язку Української академії наук національного прогресу (м. Київ) та в навчальний процес на кафедрі обчислювальної техніки у Вінницькому національному технічному університеті під час проведення занять з дисциплін: «Комп'ютерна електроніка», «Лінійні інтегральні схеми», «Аналого-цифрова техніка».

Особистий внесок здобувача полягає в теоретичному обґрунтуванні одержаних результатів, експериментальній їх перевірці та дослідженні, а також у створенні програмних продуктів для комп'ютерного моделювання. У роботах, що написані у співавторстві, автору належать: [1] – розробка математичної моделі підсилювача з регульованою чутливістю для схеми порівняння струмів; [2] – розробка математичних моделей процесу прискореного

аналого-цифрового перетворення з ваговою надлишковістю з форсуючими сигналами; [3] – розробка структурних схем АЦП зі змінними тривалостями тактів порозрядного врівноваження; [4] – аналіз СЧВН на базі двійкових базисів; [5] – розробка моделей похибок першого роду для порозрядного врівноваження; [6] – розробка математичних моделей похибок усталення; [7] – математична модель перехідних процесів під час операції порівняння аналогових сигналів з регульованою чутливістю; [8] – математична модель схеми порівняння з регульованою чутливістю для АЦП зі змінними тривалостями тактів порозрядного врівноваження; [9–12] – побудова струмових дзеркал та вихідних каскадів; [13, 14] – системне програмування.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи було апробовано в доповідях на науково-технічних конференціях: XIII міжнародній конференції з автоматичного управління „Автоматика–2006”, 25–28 вересня 2006 р. м. Вінниця; IX Міжнародній конференції «Контроль і управління у складних системах (КУСС-2008)», 21-24 жовтня 2008 р. м. Вінниця; Першій та другій міжнародних науково-практичних конференціях “Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації”, 2007 р. та 2008 р. м. Вінниця; IV Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування" СПРТП–2009, 8–10 жовтня 2009 р. м. Вінниця; Першій міжнародній науково-практичній конференції "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія" 19–21 травня 2010 р. м. Вінниця; XXXIV–XXXIX науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу співробітників та студентів ВНТУ, у 2005 р. – 2010 р. м. Вінниця.

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 50 наукових праць, серед яких 15 статей у фахових журналах, що входять до переліку ВАК України, отримано 19 патентів України на корисну модель; отримано 3 свідоцтва на комп'ютерні програми; опубліковано 13 тез доповідей міжнародних конференцій та науково-технічних конференцій професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, що містять 58 рисунків і 11 таблиць; висновків, 3 додатків, списку використаних джерел (206 найменувань). Загальний обсяг дисертації становить 185 сторінок, з яких основний зміст викладено на 132 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, зазначено її зв'язок з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету та напрямок досліджень, відзначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, надано інформацію про їх впровадження, апробацію та публікації.

У першому розділі проаналізовано динамічні характеристики сучасних АЦП порозрядного наближення, визначено поняття продуктивності стосовно аналого-цифрових перетворювачів та методи підвищення цієї продуктивності для АЦП порозрядного наближення з ваговою надлишковістю. Сформульовано задачі досліджень.

До складу динамічних характеристик аналого-цифрового перетворення входять, зокрема, динамічні похибки першого і другого роду. Динамічну похибку першого роду $\Delta A_{1дин}$, обумовлену інерційністю окремих вузлів АЦП і обумовлену тривалістю перехідних процесів, що відбуваються в цих вузлах: $\Delta A_{1дин} = A_{ex} - A_k(t)$.

Порозрядні АЦП забезпечують високу швидкодію та роздільну здатність (частота дискретизації 10 МГц при розрядності 16–18 біт). Вони найчастіше використовуються в багатоканальних системах збору і обробки даних. На рис. 1 наведено граничні параметри різних типів АЦП по точності та частоті дискретизації. Загальна продуктивність АЦП залежить від системи, у якій він використовується. Для порозрядних АЦП загального призначення основними параметрами, що впливають на продуктивність, є розрядність та частота дискретизації. Якщо основним критерієм кваліметрії взяти час перетворення, а додатковою умовою при цьому є збереження роздільної здатності, то для оцінювання

ефективності досить добутку кількості розрядів та частоти дискретизації $P = n \cdot F$, де n – кількість розрядів АЦП, F – частота дискретизації.

Динамічні похибки перетворення можуть бути зменшені: 1) схемними методами, 2) використанням комбінованих методів аналого-цифрового перетворення, 3) методом контролю й корекції процесу аналого-цифрового перетворення.

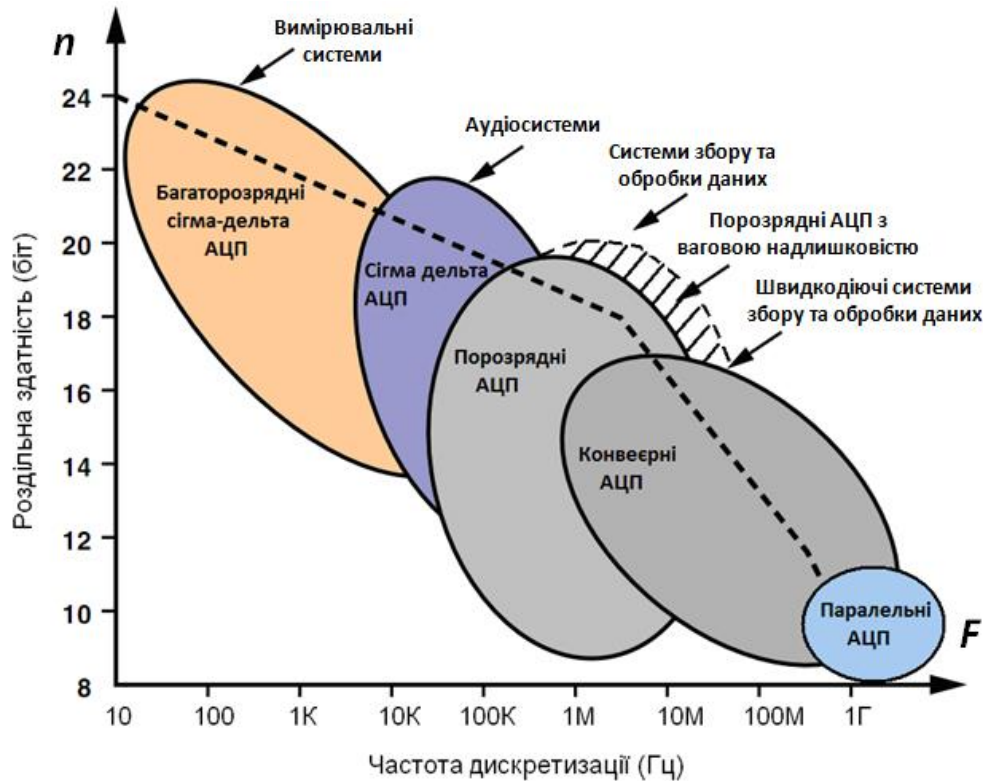


Рис. 1. Граничні параметри різних типів АЦП

Підвищення продуктивності порозрядних АЦП можна досягти двома шляхами: а) підвищення точності АЦП, побудованого на неточних елементах; б) підвищення швидкодії АЦП, побудованого на елементах середньої швидкодії.

Одним з перспективних напрямків розвитку АЦП порозрядного наближення є їхня побудова з використанням СЧВН. Однією з особливостей СЧВН є зони перекриття у шкалі системи числення, що призводять до нерозривності передатної характеристики ЦАП на їх основі.

Суть вагової надлишковості проявляється в тому, що сума ваг молодших розрядів більша або в крайньому випадку дорівнює вазі старшого розряду:

$$\sum_{j=0}^{j=i-1} Q_j \geq Q_i,$$

де Q_i – значення фізичної величини ваг розрядів (струм або напруга).

При цьому абсолютна вагова надлишковість визначається як:

$$\Delta Q_i = \sum_{j=0}^{j=i-1} Q_j - Q_i.$$

Поняття відносної вагової надлишковості визначає можливий сумарний рівень відхилень ваг розрядів, при якому характеристика перетворення залишається нерозривною:

$$\delta Q_i = \frac{\sum_{j=0}^{j=i-1} Q_j - Q_i}{\sum_{j=0}^{j=i} Q_j}.$$

За кордоном роботи в цьому напрямку також активно здійснюються, про що свідчить велика кількість патентів, що з'явилися за останні роки.

У другому розділі досліджено запропонований метод високопродуктивного аналого-цифрового перетворення зі змінними тривалостями тактів прискореного порозрядного наближення. Суть запропонованого методу, що дозволяє зменшити час перетворення, полягає в тому, що цикл аналого-цифрового перетворення зменшується, завдяки скороченню тривалості старших тактів. При цьому тривалість тактів зростає від старших до молодших. Причому останній (наймолодший такт) має тривалість, порівняну з тривалістю такту при перетворенні з постійними тривалостями тактів із ваговою надлишковістю. При цьому на старших тактах виникають значні динамічні похибки першого роду внаслідок перехідних процесів в аналогових вузлах системи. Проте використання вагової надлишковості дає змогу компенсувати похибки, що виникають на старших «неточних» тактах.

Завдяки застосуванню змінної тривалості тактів врівноваження, можна досягти вагомого скорочення загального часу врівноваження. На рис. 2. наведено діаграму врівноваження для прискореного аналого-цифрового перетворення зі змінними тривалостями тактів для $\alpha = 1,618$ і $n = 7$.

До складу АЦП порозрядного наближення з ваговою надлишковістю зі змінними тривалостями тактів врівноваження повинна входити спеціальна схема порівняння аналогових сигналів з регульованою чутливістю, швидкодія та чутливість якої змінюється на кожному такті врівноваження (рис. 3). Завдяки цьому зменшується похибка, що виникає внаслідок незавершеності перехідних процесів в аналогових вузлах. Для досягнення високої чутливості схема порівняння повинна містити: пороговий елемент у вигляді традиційного компаратора напруги, пристрій виділення різниці аналогових сигналів та підсилювач різницевого сигналу з нелінійним зворотним зв'язком (рис. 4).

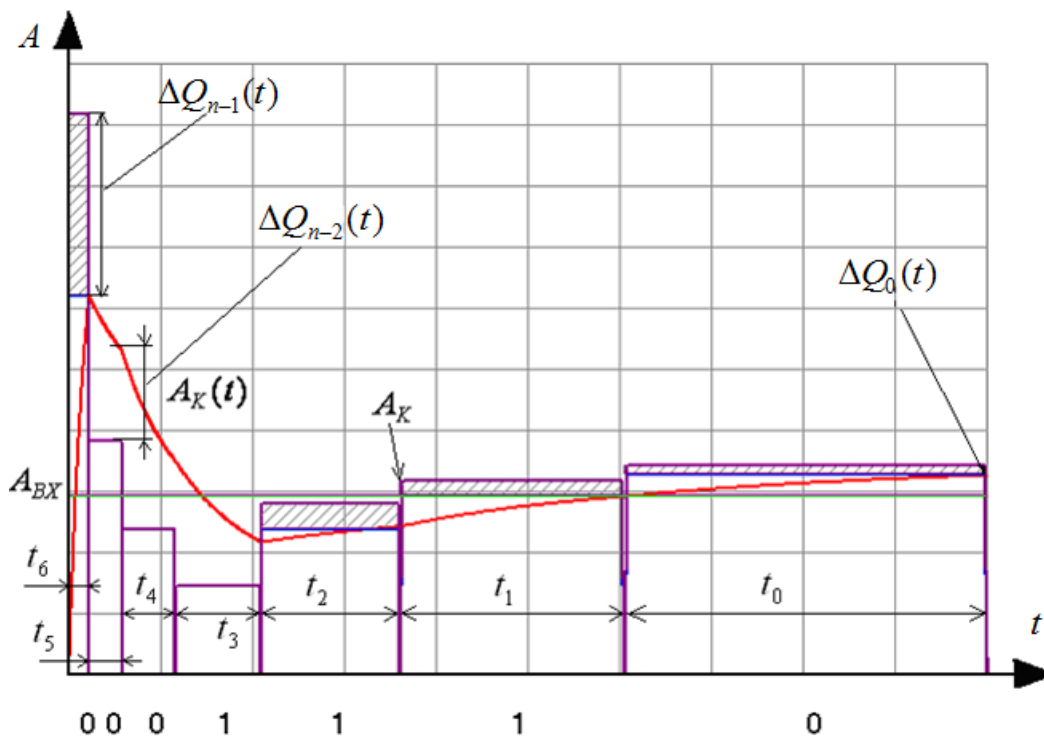


Рис. 2. Діаграма врівноваження для форсованого перетворення зі змінними тривалостями тактів

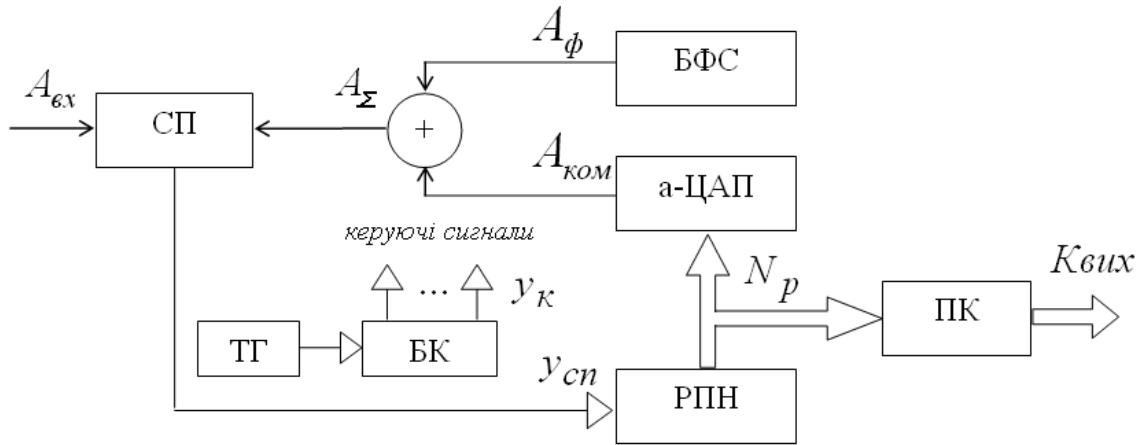


Рис. 3. Структурна схема АЦП порозрядного врівноваження СЧВН {0, 1}

Залежно від параметрів, перехідна характеристика підсилювача відповідає схемній функції першого або другого порядку (рис. 5). У першому наближенні підсилювач можна замінити RLC ланцюгом, при цьому, перехідна характеристика, що відповідає схемній функції другого порядку, має коливальний характер:

$$U_{\text{вих}}(t) = I_{\text{вх}} \frac{2\varphi_T}{I_0} + \frac{I_{\text{вх}} 2\varphi_T}{I_0 \sqrt{1 - \frac{\varphi_T^2 C}{4I_{\text{вх}}^2 L(I_{\text{вх}})}}} e^{-\frac{\varphi_T}{2I_{\text{вх}} L(I_{\text{вх}})} t} \sin\left[\frac{1}{\sqrt{L(I_{\text{вх}})C}} \sqrt{1 - \frac{\varphi_T^2 C}{4I_{\text{вх}}^2 L(I_{\text{вх}})}} t + \right. \\ \left. + \pi + \arctan\left(\frac{2I_{\text{вх}} \sqrt{L(I_{\text{вх}})} \sqrt{1 - \frac{\varphi_T^2 C}{4I_{\text{вх}}^2 L(I_{\text{вх}})}}}{\varphi_T \sqrt{C}} \right) \right],$$

де L – еквівалентна індуктивність схеми заміщення.

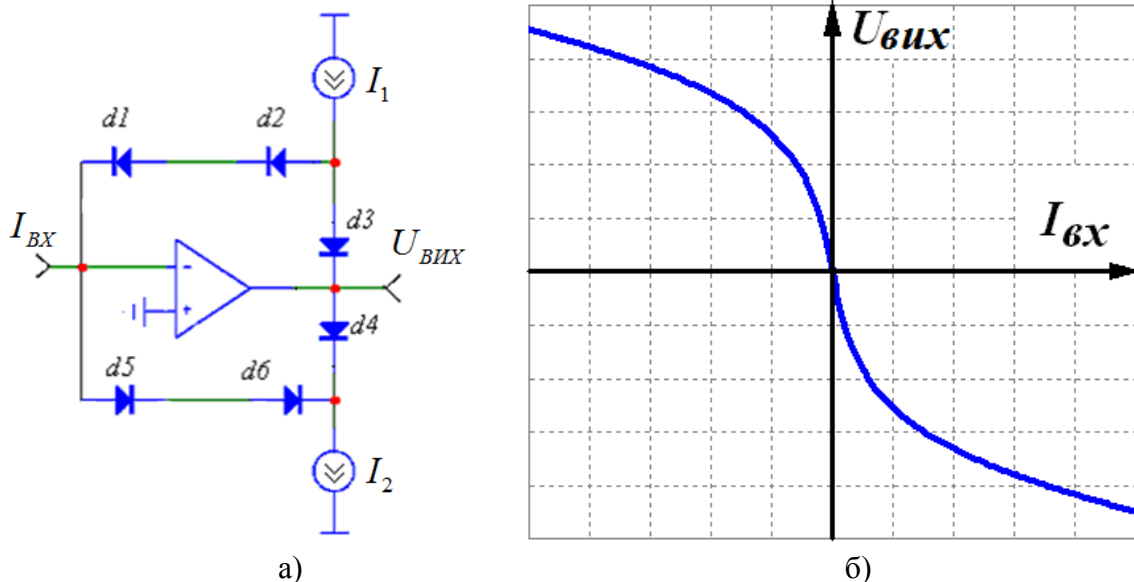


Рис. 4. Підсилювач різницевого аналогового сигналу з нелінійним зворотним зв'язком:
а) функціональна схема; б) передатна характеристика

Статична передатна характеристика підсилювача з нелінійним зворотним зв'язком (НЗЗ) визначається у вигляді:

$$U_{\text{вих}} = I_{\text{вх}} \frac{2\varphi_T}{I_0}.$$

Загальна модель операції порівняння може бути записана у формі:

$$y_i = \begin{cases} 0, & \text{при } I_{BX}(t) \leq -\frac{\Delta A_{Г.ПЕ} I_{BX}(t)}{h(t)\varphi_T}; \\ 1, & \text{при } I_{BX}(t) \geq \frac{\Delta A_{Г.ПЕ} I_{BX}(t)}{h(t)\varphi_T}; \\ y_{i-1}, & \text{при } I_{BX}(t) < \left| \frac{\Delta A_{Г.ПЕ} I_{BX}(t)}{h(t)\varphi_T} \right|. \end{cases}$$

Вагова надлишковість задається в АЦП через ЦАП, побудований на основі СЧВН. Останній можна побудувати на основі серійних двійкових ЦП. Побудова надлишкових

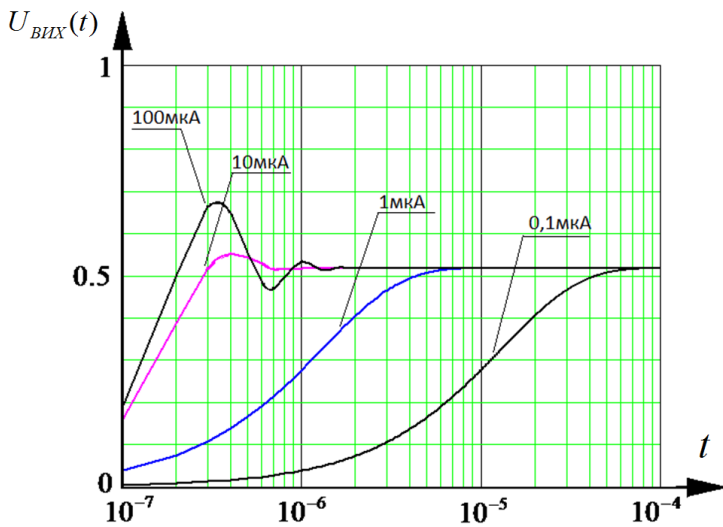


Рис. 5. Перехідна функція підсилювача різниці для різних вхідних струмів

числових базисів на основі ненадлишкових двійкових базисів породжує новий клас систем числення з ваговою надлишковістю, серед яких є системи, що мають багатозначність зображення чисел. Це дає можливість побудови надлишкових ЦАП і АЦП з покращеними статичними і динамічними характеристиками на базі традиційних двійкових ЦАП та не вимагає створення оригінальної елементної бази.

У порозрядному АЦП зі змінними тривалостями тактів врівноваження відбувається компенсація динамічних та статичних похибок за рахунок вагової надлишковості. Статична похибка

врівноваження визначається не лише похибкою квантування, а й похибкою чутливості схеми порівняння:

$$\Delta A_{ep} = \Delta A_{kv} + \Delta A_{cn}.$$

У рамках АЦП порозрядного наближення динамічна похибка першого роду обумовлена інерційністю вузлів, зокрема, ЦАП, підсилювача, схеми порівняння, а також затримкою спрацьовування цифрової частини:

$$\Delta A_{дин}(t) = A_{ex} - A_k(t).$$

Значення $A_k(t)$ наприкінці початкового $(n-1)$ -го такту відповідає

$$A_{k,n-1}(t_{m(n-1)}) = a_{n-1} Q_{n-1} (1 - e^{-t_{m(n-1)}/\tau_{(n-1)}}),$$

де $t_{m(n-1)}$ – тривалість $(n-1)$ -го такту, $\tau_{(n-1)}$ – стала часу перехідного процесу $(n-1)$ -го такту, причому t_{mi}/τ_i на всіх тактах стала.

На молодшому нульовому такті остаточно маємо

$$A_{k_0}(t_{m0}) = \sum_0^{n-1} a_i Q_i [1 - e^{-(i+1)t_{mi}/\tau_i}] = \sum_0^{n-1} a_i Q_i - \sum_0^{n-1} a_i Q_i e^{-(i+1)t_{mi}/\tau_i},$$

де t_{mi} – тривалість i -го такту, τ_i – стала часу перехідного процесу i -го такту.

На довільному i -му такті

$$A_{k_i}(t)_{дин} = \sum_j^{n-1} a_j Q_j [1 - e^{i-(j+1)t_m/\tau}] .$$

В існуючих математичних моделях АЦП порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю і постійною тривалістю тактів не враховується статична похибка схеми порівняння. Проте вагову надлишковість системи числення δQ_{max} доцільно розділити на дві частини:

$$\delta Q_{max} = \delta Q_{СП} + \delta Q_{Д} ,$$

де $\delta Q_{СП}$ – використовується на компенсацію статичних похибок, що вносяться схемою порівняння; $\delta Q_{Д}$ – використовується на компенсацію динамічних похибок.

Оптимальні параметри для порозрядного врівноваження на основі СЧВН за прискореним алгоритмом було знайдено таким чином. Складається рівняння балансу для процесу порозрядного врівноваження:

$$Q_0 + \Delta Q_{0i} + \Delta A_{нор0} + \Delta \tilde{Q}_0 - \Delta Q_{015} + \Delta A_{нор15} + \Delta \tilde{Q}_{15} = 1,5Q_0 ,$$

де ΔQ_{0i} – доважок на i -му такті врівноваження, $\Delta A_{норi}$ – поріг спрацювання компаратора на i -му такті врівноваження, $\Delta \tilde{Q}_i$ – динамічна похибка на i -му такті врівноваження.

Після розв'язання рівняння балансу отримуємо $t/\tau = -\ln(x)$ на кожному такті. Для того, щоб знайти оптимальний розподіл вагової надлишковості, синтезуємо багатовимірну функцію $T_{врів}(\alpha, n, \Delta A_{нор0})$. За допомогою цієї функції визначаємо оптимальні параметри врівноваження. Введемо розподіл вагової надлишковості на компенсацію статичних та динамічних похибок за допомогою коефіцієнта розподілу $\xi = \frac{\delta Q_{СП}}{\delta Q_{Д}}$. На рис. 6. наведено

залежність виграшу швидкодії від розподілу вагової надлишковості.

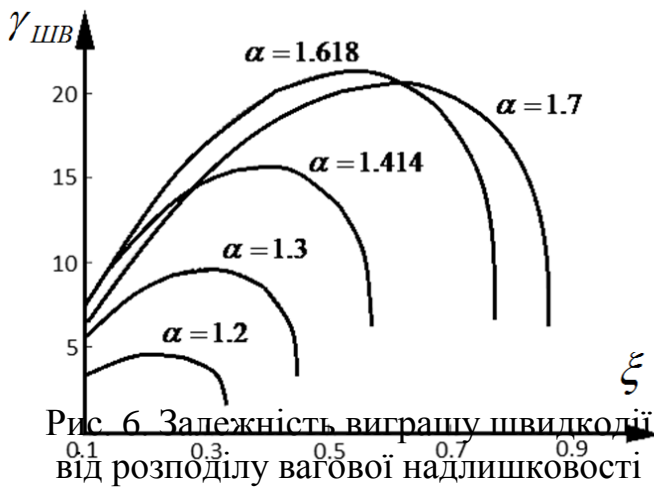


Рис. 6 Залежність виграшу швидкодії від розподілу вагової надлишковості

У третьому розділі розглянуто структурно-функціональну організацію АЦП зі змінними тривалостями тактів прискореного порозрядного наближення і регульованою чутливістю операції порівняння.

Структурна реалізація такого АЦП залежить від алгоритму, за яким працює АЦП. Структурна схема швидкодіючого АЦП порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю зі змінним набором тривалостей тактів врівноваження, який функціонує на базі на базі СЧВН $\{0, 1\}$, містить: схему порівняння (СП) з регульованою чутливістю та спеціальний цифровий

блок, тактовий генератор імпульсів регульованої тривалості для завдання різної тривалості тактів врівноваження. На рис. 7 наведено структурну схему АЦП для СЧВН $\{1, -1\}$, що

працює за алгоритмом “тільки вмикання”. Запропоновано також функціональну схему підсилювача різницевого сигналу з нелінійним зворотним зв'язком для такого АЦП (рис. 8). Тут двонаправлений відбивач струму (ДВС) та компенсатори струму (КС) утворюють вибірковий зворотній зв'язок.

Методи побудови надлишкових ЦАП на базі двійкових ЦАП розділяються на чотири категорії: 1) ЦАП на базі двох однакових двійкових ЦАП з використанням суматора (рис. 9 а)); 2) ЦАП на базі двох однакових двійкових ЦАП з використанням суматора і блока масштабування (рис. 9 б)); 3) комбінований ЦАП на базі m однакових двійкових ЦАП з використанням суматора і блоків масштабування; 4) комбінований ЦАП на базі кількох однакових (або лише одного) двійкових ЦАП з використанням комутаційної схеми.

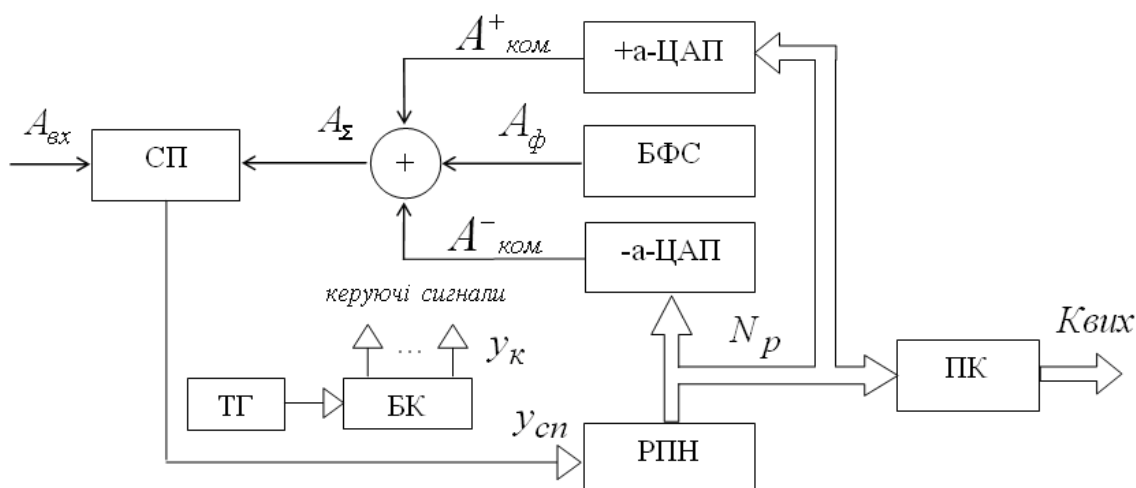


Рис. 7. Структурна схема АЦП порозрядного врівноваження на основі СЧВН $\{1, -1\}$

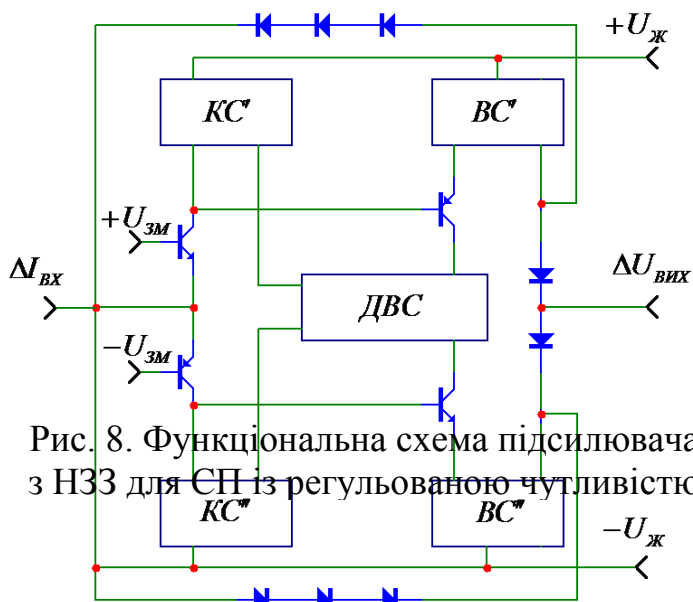


Рис. 8. Функціональна схема підсилювача з НЗЗ для СП із регульованою чутливістю

Ваги розрядів таких ЦАП повинні бути пропорційні членам числових базисів, які можна отримати простим підсумовуванням членів двох двійкових базисів. Типовими представниками такого надлишкового базису є: $\{1; 1; 2; 2; 4; 4; \dots 512; 512; \dots\}$ та $\{1; 1,41; 2; 2,83; 4; 5,66; \dots 512; 724,08; \dots\}$. При цьому номери розрядів ЦАП можна вважати парними, а ЦАП2 – непарними. Розряди ЦАП вставляються один в одного за методом гребінки (рис. 9).

Тривалість такту при аналого-цифровому перетворенні з ваговою надлишковістю з постійними тривалостями тактів врівноваження менша, ніж при класичному порозрядному врівноваженні на основі двійкової системи числення. Виграш від застосування вагової надлишковості:

$$\gamma_{шв} = \frac{(n_2 + 1) \ln \alpha}{-\ln(\delta Q + \alpha^{-n_a})},$$

де δQ – максимальне значення похибки встановлення.

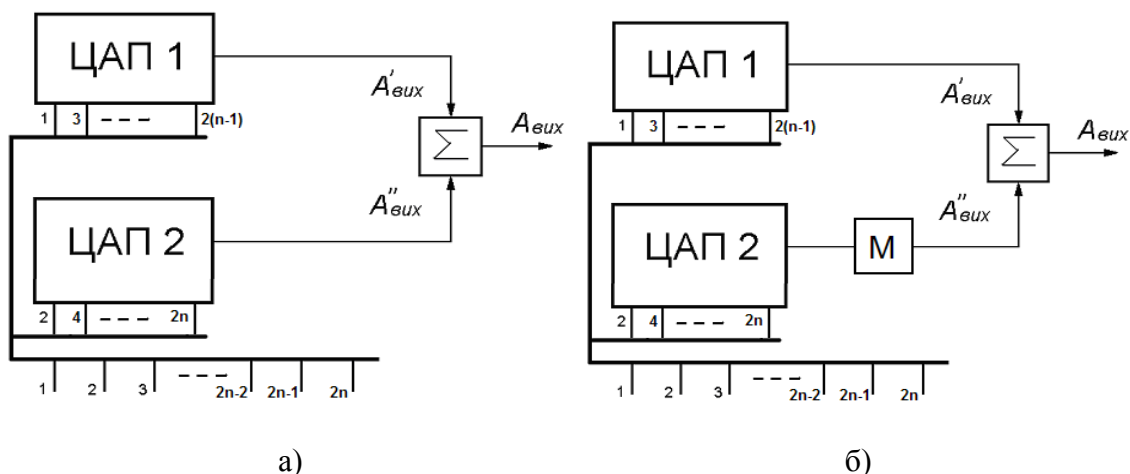


Рис. 9. ЦАП із ваговою надлишковістю, побудований на основі ненадлишкових двійкових ЦАП: а) за першим методом; б) за другим методом

Таким чином, вигравш від застосування змінних тривалостей тактів порозрядного врівноваження порівняно із традиційним двійковим врівноваженням визначається виразом:

$$\gamma_{ШВ2} = \frac{n_2(n_2 + 1)(1 - \alpha^{-1}) \ln 2}{-\ln(\delta Q \eta + \alpha^{-n})}$$

Ефективність використання вагової надлишковості можна оцінити через питому вагову надлишковість, яка враховує збільшення кількості обладнання, тобто відношення рівня вагової надлишковості до коефіцієнта подовження розрядної сітки:

$$E = \frac{\delta Q}{\gamma_n}$$

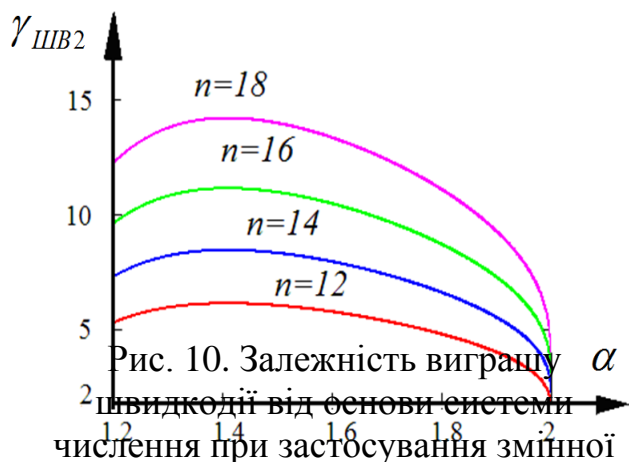


Рис. 10. Залежність вигравшу швидкодії від основи системи числення при застосуванні змінної

У четвертому розділі надано рекомендації з проектування АЦП зі змінними тривалостями тактів прискореного порозрядного наближення з ваговою надлишковістю.

Для моделювання процесу аналого-цифрового перетворення з ваговою надлишковістю та змінними тривалостями тактів врівноваження було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення.

Розроблено пристрій для порозрядного аналого-цифрового перетворення з ваговою надлишковістю зі змінними тривалостями тактів

врівноваження. Він використовується в навчальному процесі та при розробці нових алгоритмів аналого-цифрового перетворення. Пристрій дозволяє отримувати інформацію про різні характеристики процесу перетворення, змінювати алгоритм функціонування пристрою (рис. 11). До складу АЦП входить тактовий генератор для формування тактів змінної тривалості.

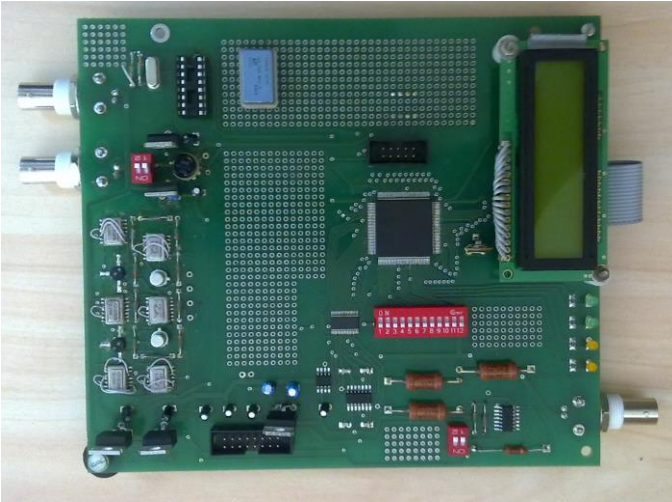


Рис. 11. Макет АЦП зі змінними тривалостями тактів порозрядного врівноваження

Для процесу врівноваження зі змінними тривалостями тактів отримано вираш продуктивності в 2 рази порівняно із класичним двійковим порозрядним наближенням. При розробці АЦП використовувалися мікросхеми програмованої логіки. На основі програмованої логіки реалізовано регістр послідовного наближення, блок форсуючих сигналів, блок керування та взаємодію із зовнішніми цифровими інтер-фейсами. Використання програмованої логіки має багато переваг.

Таблиця 1

Параметри АЦП порозрядного наближення зі змінними тривалостями тактів врівноваження

Роздільна здатність	16 біт
Час перетворення	10 мкс
Діапазон вхідного сигналу	-10В-+10В
INL	1.5 МЗР
DNL	1.5 МЗР

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Запропоновано метод підвищення продуктивності багаторозрядних АЦП із ваговою надлишковістю шляхом підвищення швидкодії зі збереженням роздільної здатності за рахунок застосування змінних, зокрема, прогресуючих тривалостей тактів прискореного порозрядного врівноваження й автоматичного регулювання чутливості операції порівняння аналогових сигналів, що дозволяє створити АЦП з покращеними динамічними характеристиками

2. Удосконалено математичні моделі статичних і динамічних похибок АЦП на основі рівнянь балансу за умови використання операції порівняння з регульованою чутливістю з урахуванням перехідних процесів компенсуючого сигналу при прискореному порозрядному врівноваженні з ваговою надлишковістю, що дозволило проаналізувати умови формування нерозривної передатної характеристики порозрядного АЦП зі змінними тривалостями тактів врівноваження за умови наявності динамічних похибок першого роду.

3. Удосконалено математичну модель перехідних процесів операції порівняння при прискореному порозрядному аналого-цифровому перетворенні з ваговою надлишковістю, у якій враховано змінення чутливості схеми порівняння під час врівноваження, що дозволило оцінити характеристики процесу врівноваження зі змінними тривалостями тактів.

4. Проведено порівняльний аналіз вирашу від застосування змінної тривалості тактів для різних алгоритмів аналого-цифрового перетворення. Показано, що використовуючи запропонований метод, можна підвищити продуктивність процесу порозрядного наближення у два рази.

5. Розроблено структурні схеми АЦП з ваговою надлишковістю і змінними тривалостями тактів врівноваження, розроблено структурні схеми ЦАП і тактового генератора. Запропоновано метод побудови ЦАП з ваговою надлишковістю на основі

існуючих двійкових ЦАП, що дозволяє будувати АЦП з ваговою надлишковістю на основі серійної елементної бази.

6. Розроблено програмне забезпечення для моделювання процесу порозрядного врівноваження зі змінними тривалостями тактів, що дозволяє промоделювати процес порозрядного наближення з різними параметрами та обрати оптимальний варіант при проектуванні АЦП.

7. Розроблено та виготовлено макет високопродуктивного АЦП порозрядного наближення зі змінними тривалостями тактів врівноваження з ваговою надлишковістю для систем аналізу звукових трактів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Решетнік О. О. Підсилювач з регульованою чутливістю для схеми порівняння струмів / О. Д. Азаров, О.О. Решетнік, С.М. Захарченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2005. – №2. – С. 5–13.

2. Формування нерозривних передатних характеристик ЦАП і АЦП на основі вагової надлишковості / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, С. М. Захарченко, [та інші] // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2006. – №3. – С. 7–15.

3. Решетнік О. О. АЦП із змінною тривалістю тактів врівноваження на основі надлишкових позиційних систем числення / О. О. Решетнік // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – №6. – С. 126–129.

4. Системи числення з ваговою надлишковістю для швидкодіючих АЦП послідовного наближення і ЦАП, що самокалібруються [Електронний ресурс] / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, С. В. Богомолів // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2008. – №3. – Режим доступу до журн: http://nbuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-3/2008-3.files/uk/08odafsc_ua.pdf

5. Решетнік О. О. Математичні моделі динамічних похибок I-го роду для швидкодіючих порозрядних АЦП із ваговою надлишковістю / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, Л. В. Крупельницький // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2009. – №2. – С. 7–13.

6. Решетнік О. О. Похибки усталення при аналого-цифровому перетворенні з прогресуючими тривалостями тактів порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, М. Ю. Шабатура // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2009. – №3. – С. 5–12.

7. Решетнік О. О. Модель операції порівняння при порозрядному аналого-цифровому перетворенні з прогресуючим набором тривалостей тактів урівноваження / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, В. А. Гарнага // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2008. – №3. – С. 5–13.

8. Решетнік О. О. Математична модель компаратора з регульованою чутливістю для швидкодіючого багаторозрядного АЦП із ваговою надлишковістю [Електронний ресурс] / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2008. – №1. – Режим доступу : <http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-1/uk.htm>

9. Патент на корисну модель №26771 Україна, МПК (2006): H03K 5/22, G05B 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струмів / Азаров О. Д., Богомолів С. В., Решетнік О. О., [та інші]; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – №u200704476; заявл. 23.04.2007; опубл. 10.10.2007, Бюл. №16.

10. Патент на корисну модель №25471 Україна, МПК (2006): H03K 5/22, G05B 1/00. Вхідний пристрій схеми порівняння струмів / Азаров О. Д., Решетнік О. О., Кадук О. В., [та інші]; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – №u200703563; заявл. 02.04.2007; опубл. 10.08.2007, Бюл. №12.

11. Патент на корисну модель №23999 Україна, МПК (2006): H03K 5/22, G05B 1/00. Підсилювач постійного струму / Азаров О. Д., Решетнік О. О., Лукашук О. О., [та

інші]; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – №u200702059; заявл. 26.02.2007; опубл. 11.06.2007, Бюл. №8.

12. Патент на корисну модель №21954 Україна, МПК (2006): Н03К 5/22, G05B 1/00. Буферний елемент / Азаров О. Д., Решетнік О. О., Лукашук О. О., Богомоллов С. В., Гарнага В. А.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – №u200611431; заявл. 30.10.2006; опубл. 10.04.2007, Бюл. №4.

13. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №26840 ПА. Україна. “Програма моделювання процесу порозрядного аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення” / Азаров О. Д., Решетнік О. О., Гарнага В. А. – Дата реєстрації 9.12.2008.

14. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №33507 ПА. України. “Програмне забезпечення для дослідження динамічних похибок першого роду в швидкодіючих порозрядних АЦП з ваговою надлишковістю та прогресуючим набором тактів врівноваження” / Азаров О. Д., Решетнік О. О., Шабатура М. Ю. – Дата реєстрації 31.05.2010.

АНОТАЦІЯ

Решетнік О. О. Високопродуктивні АЦП із змінними тривалостями тактів порозрядного наближення з ваговою надлишковістю. – Рукопис.

Дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.13.05 – комп’ютерні системи та компоненти. Вінницький національний технічний університет. – Вінниця – 2011.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню високопродуктивних АЦП із змінними тривалостями тактів порозрядного наближення з ваговою надлишковістю. Загальний науковий результат роботи – розв’язано науково-технічну задачу підвищення продуктивності АЦП порозрядного наближення з ваговою надлишковістю за рахунок скорочення часу перетворення при збереженні роздільної здатності, що дозволяє розширити сферу застосування порозрядних перетворювачів аналог-код. Запропоновано метод підвищення продуктивності АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю шляхом збільшення швидкодії, що досягається зменшенням часу врівноваження за рахунок застосування змінних тривалостей тактів прискореного порозрядного врівноваження й автоматичного регулювання чутливості операції порівняння аналогових сигналів. Подальшого розвитку отримали математичні моделі статичних і динамічних похибок прискореного порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю, що враховують використання операції порівняння аналогових сигналів із регульованою чутливістю. Це дозволяє визначити оптимальний розподіл вагової надлишковості для компенсації статичних та динамічних похибок. Запропонований підхід дозволив побудувати структурні схема високопродуктивних АЦП порозрядного наближення із ваговою надлишковістю, де введення вагової надлишковості здійснюється шляхом використання ненадлишкових двійкових ЦАП. Це дозволяє уникнути використання спеціальної елементної бази для побудови АЦП із ваговою надлишковістю.

Ключові слова: АЦП, порозрядне врівноваження, вагова надлишковість, змінна тривалість тактів, порівняння з регульованою чутливістю.

АННОТАЦИЯ

Решетник А. А. Высокопроизводительные АЦП с изменяющимися длительностями тактов поразрядного приближения с весовой избыточностью. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. Винницкий национальный технический университет. – Винница – 2011.

Диссертация посвящена исследованию высокопроизводительных АЦП с изменяющимися длительностями тактов поразрядного приближения с весовой избыточностью. Объектом исследования есть процесс высокопродуктивного ускоренного аналого-цифрового преобразования с регулируемой чувствительностью операции сравнения

значений аналоговых сигналов та с меняющимися длительностями тактов поразрядного уравнивания с весовой избыточностью. Общий научный результат работы – решена научно-техническая задача повышения производительности АЦП поразрядного приближения с весовой избыточностью за счет сокращения времени преобразования при сохранении разрешения, что позволяет расширить сферу применения поразрядных преобразователей аналог-код. Предложен метод повышения производительности АЦП последовательного приближения с весовой избыточностью путем увеличения быстродействия, что достигается уменьшением времени уравнивания за счет применения изменяющихся длительностей тактов ускоренного поразрядного уравнивания и автоматического регулирования чувствительности операции сравнения аналоговых сигналов. Дальнейшее развитие получили математические модели статических и динамических погрешностей ускоренного поразрядного уравнивания с весовой избыточностью, учитывающие использование операции сравнения аналоговых сигналов с регулируемой чувствительностью. Это позволяет определить оптимальное распределение весовой избыточности для компенсации статических и динамических погрешностей.

Усовершенствовано математическую модель переходных процессов операции сравнения при ускоренном поразрядном аналого-цифровом преобразовании с весовой избыточностью, в которой учитывается изменение чувствительности схемы сравнения во время уравнивания, что позволило оценить характеристики процесса уравнивания с меняющимися длительностями тактов.

Проведен сравнительный анализ выигрыша от использования меняющихся длительностей тактов для разных алгоритмов аналого-цифрового преобразования. Показано, что, используя предложенный метод, можно увеличить продуктивность процесса поразрядного преобразования в два раза.

Усовершенствован метод построения ЦАП с весовой избыточностью для АЦП путем введения структурной избыточности в виде нескольких двоичных ЦАП, что не требует создания оригинальной элементной базы.

Предложенный подход позволил построить структурные схемы высокопроизводительных АЦП поразрядного приближения с весовой избыточностью, где ввод весовой избыточности осуществляется путем использования неизбыточных двоичных ЦАП. Это позволяет избежать использования специальной элементной базы для построения АЦП с весовой избыточностью и применять серийную существующую элементную базу в виде двоичных ЦАП.

Разработаны структурные схемы АЦП с весовой избыточностью и меняющимися длительностями тактов уравнивания, разработаны структурные схемы ЦАП и тактового генератора. Даются рекомендации по проектированию аналоговых узлов такого АЦП. Разработано программное обеспечение для моделирования процесса поразрядного уравнивания с меняющимися длительностями тактов, что позволяет моделировать процесс уравнивания с разными параметрами и выбрать оптимальный вариант при проектировании АЦП. Это позволило улучшить процесс проектирования АЦП с весовой избыточностью. Разработан и изготовлен макет высокопроизводительного АЦП поразрядного уравнивания с меняющимися длительностями тактов, который был использован для увеличения точности и продуктивности измерительной системы анализатора параметров звуковых тактов.

Ключевые слова: АЦП, поразрядное уравнивание, весовая избыточность, изменяемая длительность тактов, сравнение с регулируемой чувствительностью.

ABSTRACT

Reshetnik O. O. High-productive ADC with changing tact durations of successive approximation with weight redundancy. – a manuscript.

The dissertation for the inception of candidate's degree in specialty 05.13.05 – computer systems and components. Vinnytsia National Technical University. – Vinnytsia – 2011.

The dissertation is dedicated to the investigation of high-productive ADCs with changing tact durations of successive approximation with weight redundancy. The total science result – the science-technical task of productivity increasing of successive approximation ADC with weight redundancy has been solved, owing to conversion time decrease with resolution saving. It allows to increase the scope of using analog-to-digital converters. The method of productivity increase of successive approximation ADC with weight redundancy is proposed, owing to operations speed increase, which is reached due to conversion time decrease, thanks the usage of changing tact durations of successive approximation and automatic regulation of analog signals comparison operation sensitivity. Mathematical models of static and dynamic errors of fast successive approximation with weight redundancy, which takes into consideration regulation of analog signals comparison operation sensitivity are elaborated. It allows to define optimal distribution of weight redundancy for static and dynamic errors compensation. The proposed approach allowed to build structure schemes of high-productive successive approximation ADCs with weight redundancy with DAC with weight redundancy based on non-redundant binary DACs. It avoids the usage of special components for building ADCs with weight redundancy and allows using serial components in the form of binary DACs.

Keywords: ADC, successive approximation, weight redundancy, variable tact duration, comparison with sensitivity regulation.

Підписано до друку 02.03.2011 р. Формат 29,7×42¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2011-071
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59