

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**Мичуда Леся Зиновіївна**

УДК 681.335 (088.8)

**ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА  
АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ  
НА КОМУТОВАНИХ КОНДЕНСАТОРАХ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

**Львів - 2019**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка»  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант** доктор технічних наук, професор  
**Пістун Євген Павлович,**  
завідувач кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Львівська політехніка», м.Львів.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Саченко Анатолій Олексійович,**  
завідувач кафедри інформаційно-обчислювальних систем та управління Тернопільського національного економічного університету, м.Тернопіль;

доктор технічних наук, професор  
**Русин Богдан Павлович,**  
завідувач відділу методів і систем дистанційного зондування Фізико-механічного інституту ім.Г.В.Карпенка НАН України, м.Львів;

доктор технічних наук, доцент  
**Мельничук Степан Іванович,**  
завідувач кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії ПВНЗ Університету Короля Данила, м.Івано-Франківськ.

Захист відбудеться «19» квітня 2019 р. о 14<sup>00</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів-13, вул. С.Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «\_\_\_» березня 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради, д.т.н., професор



Луцик Я.Т.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** У системах автоматики та автоматизації точність та швидкість отримання інформації від об'єкта є однією з визначальних для забезпечення коректної роботи усієї системи. Кількість давачів, як і кількість вхідних сигналів, відрізняються. Наприклад, для контролю заповнення баку автомобіля є один давач. Він має одну вхідну величину. Для системи контролю у «розумному домі» застосовують десятки давачів. Кожен з них має від 1 до 3 вхідних величин. А на типовій автоматизованій лінії підприємства харчової промисловості кількість давачів перевищує 200. Така кількість зумовлена багатьма факторами, що підлягають контролю. У засобах і системах медичної, військової та науково-дослідницької сфери кількість давачів може бути ще більшою.

Для покращення технічних та експлуатаційних характеристик згаданих систем необхідно покращувати метрологічні характеристики основних вузлів, наприклад, аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Оскільки вони забезпечують зв'язок сучасних цифрових систем з давачами, більшість яких мають аналогові вихідні сигнали.

Високою технологічністю виготовлення та метрологічними характеристиками вигідно відрізняються перетворювачі інформації з застосуванням схем на комутованих конденсаторах. Конденсатори вирізняються стабільністю характеристик, а значення ємностей, одержуваних у ході технологічного процесу, добре узгоджуються із заданими номіналами. Характеристики кіл на комутованих конденсаторах визначаються співвідношенням ємностей конденсаторів, які витримуються значно легше при виготовленні, ніж їх абсолютні значення. За технологічністю в інтегральному виконанні, точністю виготовлення, температурною та часовою стабільністю конденсатори не поступаються, а в розробках ряду фірм перевершують високоточні елементи інших типів і, зокрема, тонкоплівкові резистори.

Перевага схем на комутованих конденсаторах в порівнянні з АЦП на резистивних дільниках струму і напруги полягає в сумісності за технологією з сучасними стандартними КМОН цифровими вузлами, малому споживанні потужності та можливості суміщення функцій перетворення і запам'ятовування аналогового сигналу.

При цьому поряд аналого-цифровим перетворенням особливої ваги набуває задача забезпечення одночасного оброблення багатьох вхідних сигналів та можливості функціонального перетворення.

Усі ці завдання можуть виконати аналого-цифрові функціональні перетворювачі (АЦФП) на комутованих конденсаторах. Такі аналогові багатофункціональні перетворювачі (АБФП) з трьома логарифматорами випускають провідні фірми світу, наприклад, Analog Devices (AD538), Burr-Brown (4301/2), National Semiconductor (LN0094)

Більшість аналого-цифрових функціональних перетворювачів, що випускаються провідними фірмами, мають наступні обмеження: кількість

вхідних сигналів не більша трьох, а також виконання однієї певної функції – множення або ділення, або степеневі функції. Функціональні можливості перетворювачів найчастіше розширюють шляхом збільшення на їх вході кількості логарифматорів. Проте найбільшим недоліком аналого-цифрових обчислювачів з багатьма логарифматорами є те, що важко досягти ідентичності характеристик логарифматорів. Неідентичність характеристик призводить до збільшення похибки перетворення і викликає потребу в додаткових налаштуваннях, що значно ускладнює практичну реалізацію. Тому, при сучасному стані технології інтегральних схем виготовляють в одній інтегральній схемі не більше трьох логарифматорів. Перетворювачі на комутованих комірках дають змогу опрацювати до десяти вхідних сигналів без погіршення точності. Також вони виконують набір не менше як з чотирьох функцій.

Подальше вдосконалення аналого-цифрових функціональних перетворювачів є актуальною науково-прикладною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана в межах держбюджетних науково-дослідних робіт за планом Міністерства освіти і науки України, а саме: Держбюджетна тема «Проблемно-орієнтовані перетворювачі інформації» (ДБ/ЧІП, 2002-2003 р.) №д.р. 0102U001206; Держбюджетна тема «Теоретичні засади створення швидкодіючих проблемно-орієнтованих перетворювачів інформації» (ДБ/Заряд, 2004-2005 р.) №д.р. 0104U002297; Держбюджетна тема «Розвиток теорії аналізу і синтезу проблемно-орієнтованих перетворювачів інформації» (ДБ/ПЛІС, 2006-2007 р.) №д.р. 0106U001343.

**Мета і завдання досліджень.** Метою роботи є розроблення методологічних засад побудови, створення нових і вдосконалення відомих методів і засобів аналого-цифрового функціонального перетворення на комутованих конденсаторах для розширення функціональних можливостей і підвищення точності та швидкодії.

Для досягнення поставленої мети необхідним є розв'язання таких завдань:

1. Провести огляд і аналіз сучасного стану АЦФП.
2. Розробити методологічні засади побудови АЦФП на комутованих конденсаторах.
3. Розробити метод логарифмування різниці двох сигналів з підвищеною точністю.
4. Розробити метод функціонального аналого-цифрового перетворення підвищеної точності, який дозволяє отримати степеневу функцію високого порядку та корінь високого порядку.
5. Підвищити швидкодію рекурентного методу перетворення.
6. Покращити алгоритм функціонування інтерполюючих логарифмічних аналого-цифрових перетворювачів з метою підвищення його точності.

7. Розробити алгоритми функціонування та математичні моделі запропонованих методів аналого-цифрового функціонального перетворення.
8. Дослідити вплив шумів і завад, що діють на АЦФП, і оцінити значення похибок, зумовлених ними.
9. Провести комп'ютерне моделювання розроблених АЦФП.
10. Провести фізичне моделювання розроблених АЦФП.
11. Впровадити розроблені АЦФП у виробництво.

**Об'єкт дослідження** – процес аналого-цифрового функціонального перетворення інформації про стан фізичних об'єктів.

**Предмет дослідження** – методи та засоби аналого-цифрового функціонального перетворення з підвищеними функціональними можливостями, точністю та швидкістю.

**Методи досліджень.** Методологія та методи дослідження ґрунтуються на застосуванні теорії лінійних електричних кіл, диференціальних рівнянь і функцій комплексної змінної, методів імітаційного моделювання та цифрової обробки сигналів, теорії похибок, а також математичної статистики та експериментальних методів для перевірки адекватності одержаних моделей.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше розроблено методологічні засади побудови АЦФП на комутованих конденсаторах, які поєднують структурні – шляхом зміни основи логарифмування і співвідношення ємностей, та алгоритмічні – шляхом вибору числа піддіапазонів перетворення, кількості та величини кроків на кожному з них, що відкриває нові можливості підвищення точності та швидкодії АЦФП.

2. Вперше розроблено метод багатофункціонального аналого-цифрового перетворення, який відрізняється паралельним в часі опитуванням усіх логарифматорів, що дало змогу звести час перетворення до часу перетворення одного з логарифматорів, а також в часі перетворення реалізувати: операції множення та ділення, степеневі функції або корені з високими показниками порядку одиниць – десятків.

3. Вперше запропоновано метод логарифмічного аналого-цифрового перетворення різниці двох вхідних напруг, який відрізняється паралельним в часі перетворенням напруги – зменшеного шляхом перерозподілу заряду та напруги – від'ємника шляхом накопичення заряду у пасивній конденсаторній комірці, що дало змогу підвищити точність порівняно з традиційним підходом, коли спершу визначають різницю цих напруг, а потім її логарифмують.

4. Вперше запропоновано метод логарифмічного аналого-цифрового функціонального перетворення, який відрізняється тим, що на першому піддіапазоні значення компенсуючої напруги порівнюється зі значенням вхідної напруги, а на наступних – з мінімальним значенням компенсуючої напруги на попередньому піддіапазоні, що дало змогу спростити схемне рішення, зменшивши число запам'ятовуваних величин, та підвищити точність аналого-цифрових перетворювачів, що реалізовані на основі запропонованого методу.

5. Вдосконалено метод рекурентного функціонального аналого-цифрового перетворення, який відрізняється багатократним звертанням до еталону старшого розряду, що дало змогу суттєво зменшити кількість зразкових величин і підвищити швидкодію перетворення.

6. Запропоновано новий принцип дії інтерполюючих логарифмічних аналого-цифрових перетворювачів, який відрізняється застосуванням явища перозподілу заряду на етапі грубого перетворення і явища накопичення заряду на етапі точного перетворення, що дало змогу спростити алгоритм і підвищити швидкодію перетворення внаслідок виключення необхідності відтворення на етапі грубого перетворення попереднього рівня компенсаційної напруги.

7. Вперше розроблено математичні моделі та алгоритми функціонування аналого-цифрових функціональних перетворювачів, які засновані на запропонованих методах перетворення.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у наступному:

- розроблено засоби аналого-цифрового функціонального перетворення, які перевершують відомі за функціональними можливостями, точністю та швидкодією;

- розроблені програми комп'ютерного моделювання для оцінки похибок і часу перетворення АЦФП;

- запропоновані математичні моделі дають змогу прогнозувати характеристики та параметри АЦФП на комутованих конденсаторах в процесі їх проектування;

- створено ряд нових структур АЦФП, які порівняно з відомими мають вищу точність і розширені функціональні можливості;

- розроблені моделі, що враховують види шумів, які діють на АЦФП, дають змогу оцінити спричинені шумами похибки;

- розроблено схему мінімізації впливу періодичної завади на роботу АЦФП для підвищення точності;

- дано рекомендації по схемній реалізації різних видів АЦФП на комутованих конденсаторах.

**Реалізація та впровадження результатів роботи.** Основний зміст дисертаційної роботи складають результати досліджень, що виконувалися на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Львівська політехніка» за період з 2000 р. по 2018 р.

За участю авторки розроблено та впроваджено ряд нових аналого-цифрових функціональних перетворювачів на комутованих конденсаторах (НДР, що фінансувалися з 2002 р. по 2007 р. за рахунок держбюджету, а саме – Міністерства освіти і науки України):

- 1) Багатофункціональні АЦП (№д.р. 0102U001206)

- 2) Швидкодіючі інтерполяційні ЛАЦП на комутованих конденсаторах (№д.р. 0104U002297)

- 3) Швидкодіючі рекурентні ЛАЦП (№д.р. 0104U002297)

- 4) Швидкодіючі аналого-цифрові багатофункціональні перетворювачі на комутованих конденсаторах (№д.р. 0104U002297)

5) Багатоканальні ЛАЦП і ФАЦП на комутованих конденсаторах з розширеними функціональними можливостями (№д.р. 0106U001343).

Запропоновані багатофункціональні та рекурентні АЦФП використано у розробках ЛЦ ІКД НАН і та ДКА України, зокрема, при розробці апаратури для космічних досліджень.

Використані у розробках пристрої захищені патентами України на винаходи.

Акти впровадження та використання результатів дисертаційної роботи наведені у Додатку 1.

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові результати отримані дисертантом самостійно. У роботах, які опубліковані у співавторстві, дисертанту належать постановка задач, концепції та принципи побудови, розробка алгоритму функціонування, розробка математичних моделей, комп'ютерне моделювання, основні математичні викладки, постановка чисельного експерименту, аналіз результатів.

У працях, опублікованих у співавторстві, авторці належать: [1, 2, 3, 30, 45, 46] – розробка алгоритму функціонування та комп'ютерне моделювання; [8, 28, 29, 37, 38] – розробка алгоритму функціонування; [6, 13, 20] – методика оцінювання динамічних властивостей; [10, 15, 31, 39] – методика оцінювання точності; [19, 49] – концепція та принцип побудови; [4, 5, 9, 14, 16, 18] – постановка чисельного експерименту, основні математичні викладки та аналіз результатів; [11, 12, 17] – постановка задач і концепції побудови; [21 – 24, 43] – комплексний аналіз проблем розвитку АЦФП і розроблення шляхів їх вирішення; [7, 32, 44] – формальний опис і методика дослідження запропонованого методу помноження, [25] – розробка багатофункціонального перетворювача підвищеної точності та швидкодії.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати виконаних у дисертації досліджень доповідалися і обговорювалися на 11 міжнародних науково-технічних конференціях, симпозіумах і семінарах, зокрема:

1. XII Міжнародна науково-технічна конференція «Приборостроение – 2003», Вінниця – Корейз, 2003
2. XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приборостроение – 2004», Вінниця – Корейз, 2004
3. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Наука и предпринимательство – 2005», Вінниця – Ялта, 2005.
4. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Вимірювання витрати та кількості газу», Івано-Франківськ, 2005
5. 5-а міжнародна науково-практична конференція «Проблеми економії енергії», Львів, 2008р
6. Міжнародна науково-технічна конференція «Датчики, прилади та системи – 2008», Черкаси – Гурзуф, 2008р.
7. Міжнародна наукова конференція «Контроль і управління в складних системах» (КУСС – 2010), Вінниця, 2010

8. XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління Автоматика/Automatics – 2011 , Львів, 2011.
9. Перша міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС – 2011), Вінниця, 2011.
10. XVII міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», Київ, 2018р.
11. XXV Міжнародна конференція з автоматичного управління Автоматика/Automatics – 2018 , Львів, 2018.

Результати роботи також доповідалися на наукових семінарах кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Львівська політехніка».

**Публікації результатів досліджень.** Основний зміст роботи опублікований у 57 наукових працях, у тому числі: 4 статтях у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз (1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави, що входить до наукометричної бази Scopus [19], 1 стаття у виданні, що входить до наукометричної бази Scopus [27], 2 статті у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus [25, 26]), 24 наукових статтях у наукових фахових виданнях України [1 – 18, 20 – 24], 16 матеріалах науково-технічних конференцій [28 – 43], 6 патентах [44 – 48, 51] та 2 заявках України [50, 52] на винаходи та 1 патенті Польщі на винахід [49].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури і додатків. Основний зміст викладено на 295 сторінках, 53 сторінки займають 14 таблиць і 132 рисунки. Список використаних джерел із 302 найменувань наведений на 36 сторінках, 4 додатки наведено на 108 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** відображено актуальність проблеми, обґрунтовано мету та основні задачі дослідження. Показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Сформульовано наукову новизну та положення, що виносяться на захист. Розглянуто практичну цінність, реалізацію та впровадження результатів роботи. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи і публікації.

У **першому розділі** проведено огляд і аналіз сучасного стану методів і засобів аналого-цифрового та функціонального перетворення, характеристик аналого-цифрових функціональних перетворювачів і запропоновано їх класифікацію.

Відзначено широке застосування функціональних перетворювачів (ФП), які за призначенням поділяють на вимірювальні та формуючі; за кількістю вхідних сигналів – на ФП з 1 вхідним сигналом і ФП з багатьма вхідними сигналами; за виконуваними функціями – на арифметичні, перетворювачі елементарних функцій, перетворювачі тригонометричних функцій,



однофункціональні та багатфункціональні. Зауважимо, що ФП однофункціональні найчастіше називають не ФП, а за видом виконуваної функції. Окрім того, до функціональних відносяться перетворювачі, за часте застосування яких їх виділили в окремі проіменовані групи пристроїв, а саме: помножувачі, логарифматори, інтегратори, квадратори, пристрої піднесення до степеня, тощо.

За формою вихідного сигналу ФП поділяють на цифрові та аналогові. При цьому варто виділити, що до цифрових відносяться ФП з вихідним кодом у вигляді число-імпульсної послідовності та з паралельним вихідним кодом: двійковим, двійково-десятковим, псевдовипадковим та іншим. Особливий внесок у розвиток теорії та практики побудови число-імпульсних функціональних перетворювачів зроблено науковою школою Дудикевича В.Б. Роботи провідних науковців цієї школи, зокрема: Дудикевича В.Б., Максимовича В.М., Мороза Л.В., мали суттєвий вплив на дослідження викладені у цій роботі.

Особливо доцільним та перспективним є поєднання аналого-цифрового та функціонального перетворення у одному пристрої – це аналого-цифровому функціональному перетворювачі (АЦФП).

Пристрої аналого-цифрового перетворення класифікують за характеристикою перетворення на лінійні та нелінійні. Лінійні, за звичай, мають вищу швидкодію, а нелінійні, зокрема логарифмічні, – ширший динамічний діапазон вхідних сигналів.

За способом перетворення і лінійні, і логарифмічні АЦП можуть бути паралельними, порозрядного кодування і послідовної лічби. Окрім того є особливі за алгоритмом функціонування АЦП, наприклад, рекурентні, конвеєрні, сігма-дельта. Зокрема, рекурентні АЦП класично застосовують для підвищення швидкодії у цифрових системах.

Проводячи огляд сучасного стану побудови та вдосконалення аналого-цифрових перетворювачів в Україні варто відзначити провідні наукові школи та роботи їх науковців. Зокрема, Стадника Б.І., Орнатського П.П., Смолова В.Б., Гітиса Е.І., Кондалєва А.І., Багацького В.А., Романова В.О. А також Азарова О.Д. і Мичуди З.Р., які мали суттєвий вплив на дослідження, викладені у цій роботі.

Основою для побудови логарифмічних АЦП можуть бути: інтегруючі перетворювачі; сітки резисторів – вагові резистори, матриці резисторів  $R - 2R$ , регулярні структури; комутовані конденсатори. Схеми на комутованих конденсаторах можуть працювати як на основі явища перерозподілу заряду, так і на основі накопичення заряду.

Використання схем на комутованих конденсаторах дає змогу значно зменшити споживану потужність пристроїв, що особливо важливе для інтегрального виконання.

Аналіз першоджерел дав змогу виявити наступні переваги схем з комутованими конденсаторами: а) можливість їх реалізації за КМОН-технологією, яка на сьогоднішній день є найпоширенішою; б) КМОН-

технологія дозволяє простим способом реалізувати конденсатор з точністю виконання значно кращою, за точність виконання резисторів; в) характеристики кіл на комутованих конденсаторах визначаються співвідношенням ємностей конденсаторів, які витримуються значно легше, ніж їх абсолютні значення; г) схеми на комутованих конденсаторах, на відміну від аналогів на резистивних дільниках струму і напруги, є сумісними за технологією з сучасними стандартними КМОН цифровими вузлами; д) перетворення та можливість суміщення функцій запам'ятовування аналогового сигналу; е) температурна та часова стабільність, мала споживана потужність.

Задля об'єктивної картини зазначимо також певні недоліки таких схем:

а) труднощі забезпечення точних геометричних розмірів конденсаторів на кристалі; б) вплив паразитних ємностей; г) дещо менша швидкодія порівняно з біполярними пристроями.

Перелічені недоліки не є визначальними, особливо з урахуванням встановлених переваг, а отже, схеми на комутованих конденсаторах є перспективними для побудови АЦФП.

Запропоновану класифікацію АЦФП на комутованих конденсаторах показано на рис. 1.

На основі проведеного огляду зроблено наступні висновки:

– число-імпульсні функціональні перетворювачі мають широкі функціональні можливості та високу точність, що визначається фактично розрядністю використаних у них лічильників. Проте необхідність забезпечення вхідних сигналів у вигляді число-імпульсних кодів ускладнює їх практичне застосування, оскільки переважна більшість давачів найрізноманітніших систем мають аналоговий вихідний сигнал.

– багатофункціональні перетворювачі випускаються провідними фірмами світу, наприклад, Analog Devices (AD538), Burr-Brown (4301/2) і National Semiconductor (LN0094); вони є аналоговими типу логарифм – антилогарифм, мають широкий динамічний діапазон вхідних сигналів 80 дБ і високу точність класу 0.25, але малу кількість входів, лише 3. Кількість входів рівна кількості використаних логарифматорів і обмежується можливістю забезпечення ідентичності цих логарифматорів. Для розширення функціональних можливостей ФП необхідно збільшити кількість входів, тобто – кількість ідентичних логарифматорів.

– більшість сучасних інтегральних ЛАЦП побудовані з однакових структурних блоків, є конвеєрними, мають широкий динамічний діапазон вхідних сигналів 80 дБ, середню точність (8 двійкових розрядів), низьке співвідношення сигнал/шум (40 дБ).

– аналого-цифрові функціональні перетворювачі побудовані на комутованих конденсаторах, відносяться до типу логарифм-антилогарифм, мають широкий динамічний діапазон вхідних сигналів 80 дБ, гнучкі у застосуванні в найрізноманітніших системах, оскільки їх вхідний сигнал аналоговий, а можливість задання будь-якої основи логарифму розширює

функціональні можливості. Проте потребують вдосконалення та додаткового дослідження методи підвищення точності та швидкодії АЦФП, а також – дослідження впливу завод і шумів.

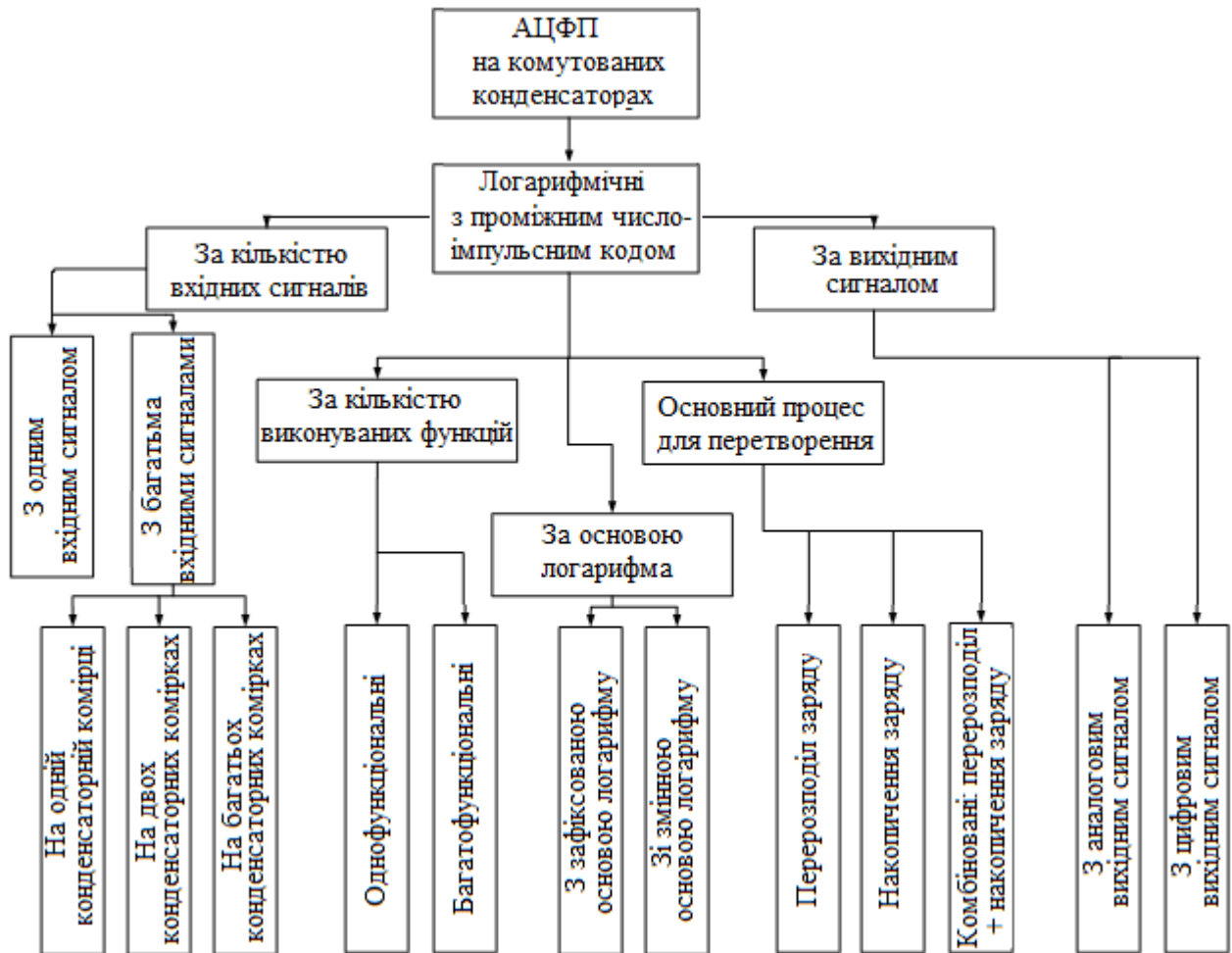


Рис.1. Класифікація аналого-цифрових функціональних перетворювачів на комутованих конденсаторах

– для побудови перетворювачів на основі комутованих конденсаторів перспективним є поєднання властивостей аналого-цифрових і функціональних перетворювачів, причому доцільним є розробити методологію підвищення точності та швидкодії АЦФП шляхом поєднання структурних та алгоритмічно-інформаційних засад.

На основі проведеного дослідження відомих АЦП і АЦФП здійснено постановку задач досліджень.

**Другий розділ** присвячено методологічним засадам створення нових методів і принципів побудови аналого-цифрових функціональних перетворювачів, що базуються на поєднанні структурних та алгоритмічних принципів підвищення точності та швидкодії аналого-цифрового перетворення на основі властивостей конденсаторних комірок.

Шляхом розробки нових структур логарифмічних АЦП йде наукова школа у «Львівській політехніці». Введенням вагової надлишковості та

додаткових алгоритмів, зокрема, самокалібрування, вирішує проблему покращення точності АЦП наукова школа проф. Азарова О.Д. у ВНТУ.

Авторкою запропоновано поєднати ці два підходи.

Методологічні засади побудови АЦФП на комутованих конденсаторах поєднують структурні, – шляхом зміни основи логарифмування і співвідношення ємностей, та алгоритмічні, – шляхом вибору числа піддіапазонів перетворення, кількості та величини кроків на кожному з них.

Зокрема, запропоновано використовувати наперед розрахований ряд значень основ логарифмів, що безпосередньо визначають похибку перетворення, а отримуються із співвідношення ємностей конденсаторів комірок.

Основа логарифму впливає на похибку перетворення встановлюючи величину кроку формування логарифмічної характеристики. Вибір числа кроків визначатиме швидкодію. Властивості конденсаторних комірок при перерозподілі та накопиченні заряду дають змогу будувати логарифмічні характеристики кроками зверху вниз та знизу догори, що сприяє оптимізації перетворення в часі.

Вибір числа кроків перетворення, величини кроку, а також поділ усього діапазону перетворення становлять алгоритмічну частину методології підвищення точності та швидкодії. Поділивши весь діапазон перетворення на декілька піддіапазонів і встановлюючи на кожному з них іншу основу логарифму та величину кроку, знайдемо оптимальне співвідношення між значенням похибки та часом перетворення. Можна досягнути заданого значення вхідної величини максимально швидко і проводити його уточнення до досягнення бажаної точності.

Достоїнством такого підходу є можливість вибору бажаних метрологічних характеристик ще до початку перетворення. А запропоновані в межах розробленої методології методи та принципи побудови та схемна реалізація АЦФП забезпечують те, що фактично отримані значення похибок і часу перетворення будуть меншими від початково заданих.

Нові структури на конденсаторних комірках будуть працювати за алгоритмами з уточненням бажаних метрологічних характеристик у процесі перетворення. Підставою та механізмом уточнення є саме можливість вибору основи логарифмування, яка безпосередньо впливає на крок перетворення та похибку перетворення.

Введення до структур перетворювачів блоків різних ємностей та керуючо-перемикальних блоків дозволяє вибирати піддіапазон перетворення. Розрахований ряд співвідношень основи логарифма з ємностями конденсаторних комірок спрощує виготовлення блоків ємностей. А виготовлення декількох конденсаторів є технологічнішим і нескладнішим від виготовлення резистора. Технологія виготовлення конденсаторів також дозволяє виготовити комірки з максимально близькими параметрами ємностей, що зменшує похибки неідентичності комірок і сприяє нарощенню числа

вхідних величин, як при простім збільшенні кількості відповідних комірок, та і шляхом певних алгоритмічних і схемотехнічних вдосконалень.

Запропоновані методологічні засади відкривають нові можливості по нарощенню кількості вхідних величин без втрати точності, підвищенню точності та швидкодії, а також по підбору необхідних метрологічних характеристик АЦФП для конкретних задач автоматики, автоматизації та інформаційно-вимірювальної техніки.

Новий метод аналого-цифрового багатфункціонального перетворення.

Для побудови багатфункціонального та багатвходового перетворювача авторкою запропоновано новий метод аналого-цифрового перетворення. Його суть ілюструють епюри, наведені на рис.2, де позначені вхідні напруги  $U_{IN1}, U_{IN2}, \dots, U_{INn}$ , опорна напруга  $U_0$ , компенсуюча напруга  $U_k$  та кількість дозувань – кроків перетворення  $n_k$ . У ході перетворення компенсуюча напруга  $U_k$  змінюється від початкового рівня опорної напруги  $U_0$  та порівнюється з вхідними напругами  $U_{IN1}, U_{IN2}, \dots, U_{INn}$ .

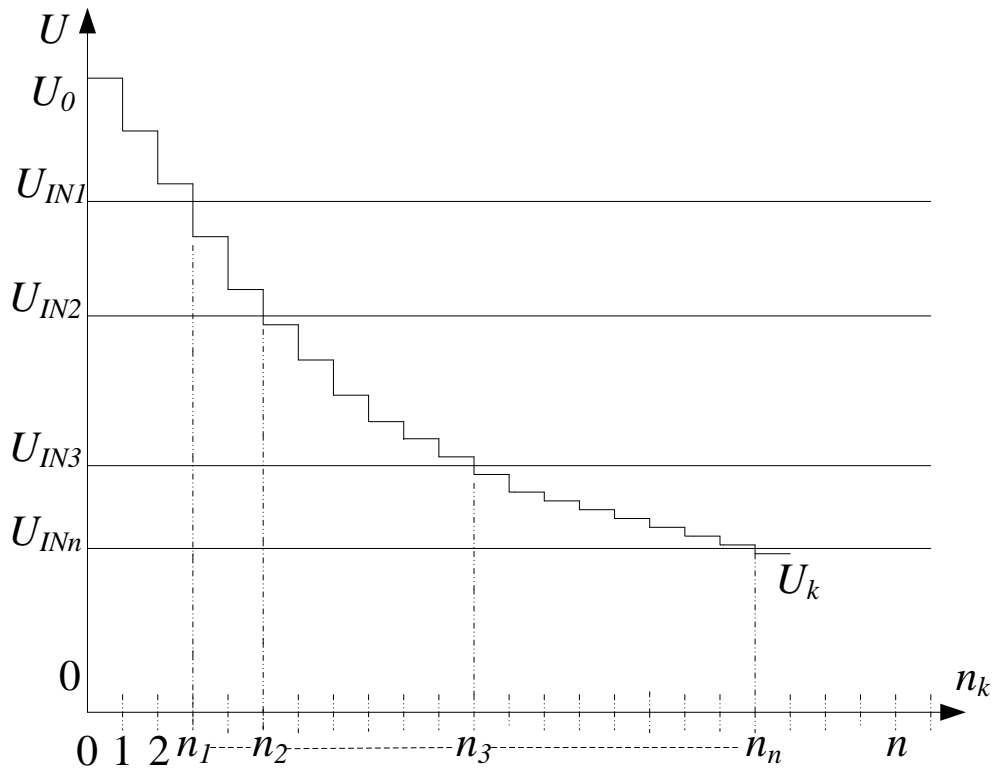


Рис.2. Епюри напруг, що ілюструють суть запропонованого методу багатфункціонального аналого-цифрового перетворення

В часі формування дозованої кількості електрики в конденсаторній комірці вихідний сигнал її підводиться до об'єднаних входів всіх логарифматорів, що поділені на дві групи. У цей же час, тобто синхронно, на виходах всіх логарифматорів формуються елементи (імпульси) їх вихідних число-імпульсних кодів. Тому, підключаючи по чергову в цьому інтервалі часу вихід кожного логарифматора першої та другої групи відповідно до входу

додавання та віднімання реверсивного лічильника, отримують на виході цього лічильника алгебраїчну суму елементів вихідних число-імпульсних кодів логарифматорів.

Після закінчення перетворення останнім логарифматором (ним буде логарифматор, до входу якого буде підведено найменший зі всіх вхідних сигналів) на виході реверсивного лічильника буде записана алгебраїчна сума вихідних число-імпульсних кодів логарифматорів, тобто код

$$N_c = \frac{1}{\ln \zeta} \cdot \left( \sum_{d=1}^m \ln \frac{U_{1d}}{U_{ref}} - \sum_{v=1}^p \ln \frac{U_{2v}}{U_{ref}} \right), \quad (1)$$

де  $d$  – кількість логарифматорів першої групи 1, що підключаються до входів додавання реверсивного лічильника ЛР, причому  $d$  змінюється від 1 до  $m$ ;

$v$  – кількість логарифматорів другої групи 2, що підключаються до входів віднімання реверсивного лічильника ЛР, причому  $v$  змінюється від 1 до  $p$ .

Вихідний код  $N_c$  реверсивного лічильника ЛР поступає на вхід цифрового антилогарифматора АЛ, на виході якого формується результат функціонального перетворення

$$N_{fp} = \text{anti ln } N_c. \quad (2)$$

Оскільки імпульси на виходах всіх логарифматорів, які здійснюють перетворення, появляються одночасно, то почергове підключення під час дії імпульса Q2 формувача ФП виходу кожного логарифматора до відповідного входу реверсивного лічильника ЛР дає змогу в часі перетворення логарифматорів: 1) отримати алгебраїчну суму вихідних кодів логарифматорів і реалізувати операції множення та ділення, тобто

$$\prod_{d=1}^m U_{1d}, \quad \prod_{v=1}^p U_{2v}, \quad \frac{1}{\prod_{v=1}^p U_{2v}}, \quad \prod_{d=1}^{d=m} \frac{U_{1d}}{U_{2v}};$$

2) отримати суму вихідних кодів логарифматорів, на  $m$  закорочених входів першої групи яких подано вхідний сигнал  $U_{bx}$ , і забезпечити реалізацію степеневі функції з показником  $m$ , тобто  $U_{bx}^m$ ; 3) отримати різницю вихідних кодів логарифматорів, на  $p$  закорочених входів другої групи яких подано вхідний сигнал  $U_{bx}$ , і забезпечити реалізацію кореня з показником  $p$ , тобто  $\sqrt[p]{U_{bx}}$ .

Таким чином алгебраїчне додавання вихідних число-імпульсних кодів логарифматорів відбувається по-елементно паралельно і тим самим значно збільшується швидкодія функціонального перетворювача.

Новий метод логарифмування різниці двох напруг. Багато вимірювальних задач потребують перетворення різниці двох напруг. Класичний підхід полягає саме у визначенні різниці та подальшому її логарифмуванні для проведення аналого-цифрового перетворення. Проте, такий спосіб накопичує похибки перетворення. З метою підвищення точності

авторкою було запропоновано новий метод логарифмування різниці двох напруг. Епюри напруг, що пояснюють його суть, наведено на рис.3, де позначено дві вхідні напруги:  $U_{IN1}$  ( $U_1$ ) – відповідає більшій вхідній напрузі, тобто зменшуваному,  $U_{IN2}$  ( $U_2$ ) – відповідає меншій вхідній напрузі, тобто від’ємнику,  $U_0$  – це опорна напруга та дві компенсуючі напруги  $U_{k1}$  та  $U_{k2}$ , кількість дозувань – кроків перетворення  $n_k$ .

У ході перетворення дві компенсуючі напруги формуються одночасно:  $U_{k1}$  шляхом перерозподілу заряду у вигляді спадної розгортки,  $U_{k2}$  шляхом накопичення заряду у вигляді зростаючої розгортки. Процес відбувається до моменту рівності першої вхідної та першої компенсуючої напруг і рівності другої вхідної та другої компенсуючої напруг.

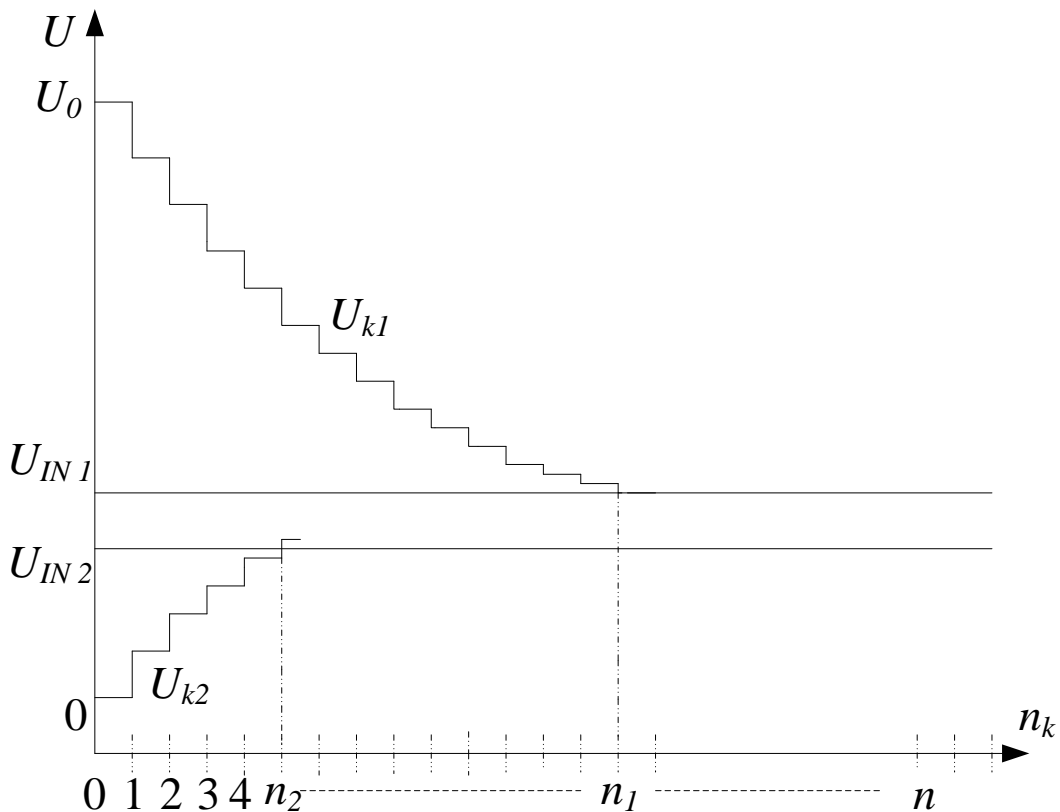


Рис.3. Епюри напруг, що пояснюють суть запропонованого методу логарифмічного аналого-цифрового перетворення різниці двох напруг

Сутність запропонованого авторкою методу логарифмічного аналого-цифрового перетворення різниці двох вхідних напруг  $U_1$  і  $U_2$  полягає у перетворенні різниці  $U_1 - U_2$  на добуток двох множників  $U_1 \cdot \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right)$  і визначенні результату як суми логарифмів цих множників, причому визначають логарифм першого множника як логарифм відношення  $\frac{U_1}{U_0}$ , де  $U_0$  – значення опорної напруги, яке задають рівним або більшим номінального

значення вхідної напруги  $U_1$ , а логарифм другого множника  $\left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right)$  визначають за методом зрівноваження, в якому формують компенсаційну напругу  $U_k$  шляхом зміни заряду на нагромаджувальному конденсаторі періодично повторюваними дозованими кількостями електрики до моменту переходу компенсаційної напруги  $U_k$  через рівень вхідної напруги  $U_2$  та визначають результат логарифмування другого множника як число дозувань, причому дозовані кількості електрики формують зарядом дозуючого конденсатора до рівня вхідної напруги  $U_1$ , а ємність дозуючого конденсатора задають згідно формули  $C_d = \frac{1-\zeta}{\zeta} \cdot C_n$ , де  $C_n$  – ємність нагромаджувального конденсатора, причому  $C_n \gg C_d$ , а  $\zeta$  – коефіцієнт дозування, який задають меншим одиниці.

Таким чином, додаючи число-імпульсні коди ЛАЦП з перерозподілом заряду ( $N_{\text{вих1}}$ ) і спадною розгорткою та ЛАЦП з накопиченням заряду у пасивній конденсаторній комірці ( $N_{\text{вих2}}$ ) і наростаючою розгорткою, отримуємо в часі перетворення суму, тобто логарифм різниці напруг  $U_1 - U_2$ :

$$N_{\text{вих}} = N_{\text{вих1}} + N_{\text{вих2}} = \frac{1}{\log \zeta} \log \frac{U_1}{U_0} + \frac{1}{\log \zeta} \log \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right) = \frac{1}{\log \zeta} \log \frac{U_1 - U_2}{U_0}. \quad (3)$$

Розвиток рекурентного методу аналого-цифрового функціонального перетворення. Авторкою було запропоновано метод [26, 47], що дав змогу підвищити швидкодію логарифмічного аналого-цифрового перетворення із збереженням високої точності. Сутність розвитку рекурентного методу аналого-цифрового функціонального перетворення полягає у тому, що вага старшого розряду використовується багатократно і в момент переходу компенсаційної напруги через рівень вхідного сигналу реєструється значення старших розрядів вихідного коду як добуток ваги старшого розряду на кількість використань цієї ваги (не рахуючи переходу), а значення молодших розрядів визначається як у класичному рекурентному методі.

Суть вдосконаленого методу пояснюють епюри напруг, наведені на рис.4. Особливістю цього методу є перетворення у два етапи. На першому відбувається багатократне звертання лише до еталону першого розряду. На другому етапі вхідна напруга порівнюється з еталоном кожного з наступних розрядів тільки один раз.

Вихідний код ( $N$ ) логарифмічного аналого-цифрового перетворювача, в якому реалізовано запропонований рекурентний метод, рівний сумі кодів на першій ( $N_1$ ) і другій ( $N_2$ ) ділянках

$$N = N_1 + N_2 \quad \text{або} \quad N = \frac{N_n}{2} \cdot \left( n_1 + \sum_{i=2}^n A_i \cdot \frac{1}{2^{i-1}} \right), \quad (4)$$



тобто є пропорційний логарифму відношення вхідної напруги  $U_{ВХ}$  до опорної  $U_0$ :  $N = \frac{1}{\log \zeta} \cdot \log \frac{U_{ВХ}}{U_0}$ . Тут  $\frac{N_H}{2}$  – вага першого (старшого) розряду вихідного коду перетворювача;  $n_1$  – кількість звертань до першого розряду, тобто кількість тактових імпульсів на першому етапі перетворення;  $A_i$  – коефіцієнт, що приймає в кожному  $i$ -такті перетворення значення 1 або 0 відповідно до стану компаратора логічна «1» або логічний «0».

Завдяки такому удосконаленню рекурентного методу суттєво зменшується кількість зразкових величин і значно підвищується швидкодія перетворення, порівняно з класичним рекурентним методом.

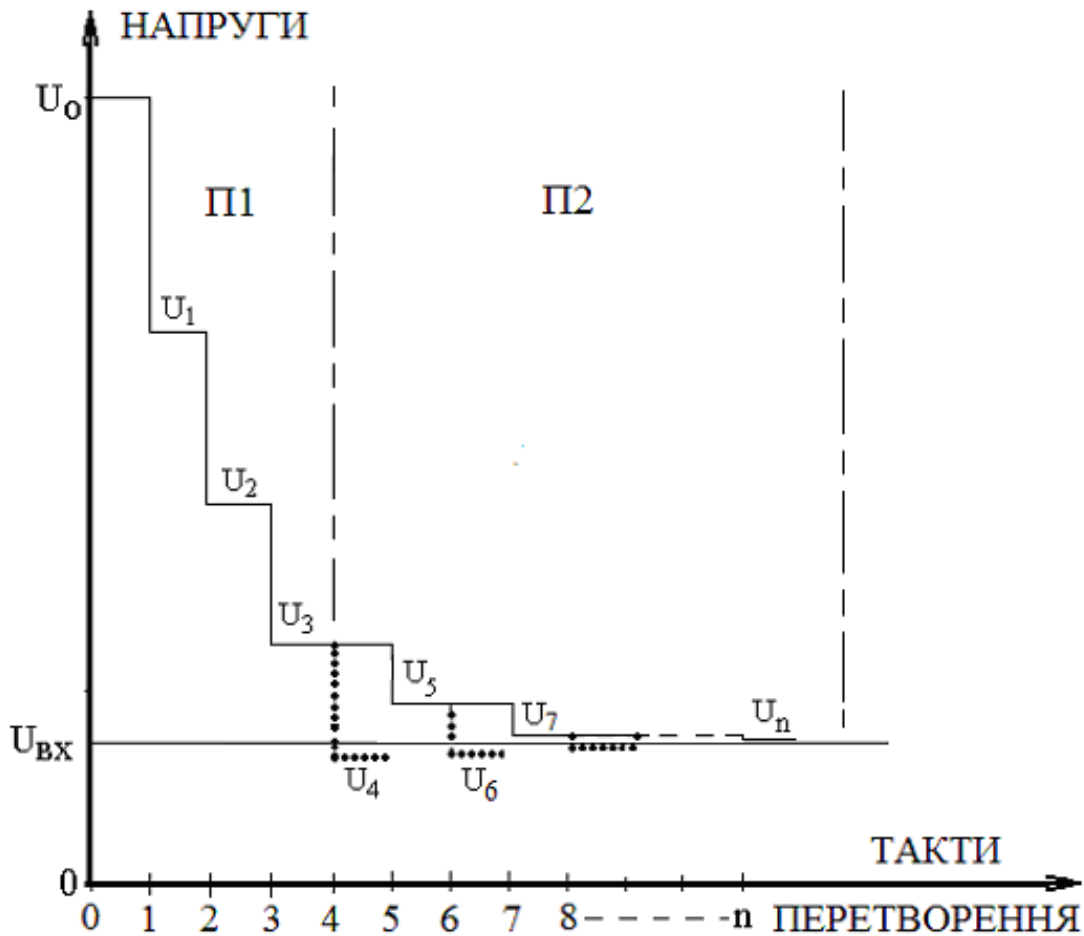


Рис.4. Епюри напруг, що ілюструють роботу АЦФП, в якому реалізовано запропонований рекурентний метод

Розвиток методу аналого-цифрового функціонального перетворення із змінною основою логарифма. Побудова характеристики перетворення АЦФП на КК можлива кроками – сходинками зверху вниз, утворюючи спадну розгортку, або кроками знизу догори при зростаючій розгортці, а також, почергово змінюючи напрям розгортки на окремих піддіапазонах отримаємо двосторонню розгортку.

Основа логарифма відповідає за висоту кожної окремої сходинки  $i$ , відповідно, за швидкість перетворення. Схеми зі змінною основою логарифма дають змогу вибрати необхідну точність та швидкодію перетворення.

Можна реалізувати два способи зміни основи логарифма. А саме, зі зміною опорної напруги або зі зміною співвідношення ємностей конденсаторів комірки.

При перетворенні із зміною основи логарифму спочатку розбиваємо діапазон перетворення на декілька, наприклад,  $m$ -піддіапазонів і формуємо компенсаційну напругу  $U_k$  на кожному  $i$ -піддіапазоні ( $U_{k_i}$ ) за наступним виразом:

$$U_{k_i} = U_{B_i} \zeta_i^{n_i}, \quad (5)$$

де  $n_i$  – число дозувань на  $i$ -піддіапазоні;  $U_B$  – початкове значення напруги на  $i$ -піддіапазоні;  $\zeta$  – основа логарифму на  $i$ -піддіапазоні.

На кожному піддіапазоні необхідно змінювати компенсаційну напругу від початкового рівня  $U_B$  до моменту переходу через рівень вхідного сигналу (момент рівності фіксується компаратором). Початковий рівень напруги  $U_k$  на першому піддіапазоні рівний опорному, тобто  $U_{B_1} = U_0$

Число дозувань на  $i$ -піддіапазоні пропорційне логарифму вхідної напруги  $U_{IN}$

$$n_i = \frac{1}{\log \zeta_i} \log \frac{U_{IN}}{U_{B_i}}. \quad (6)$$

і саме воно визначає кількість кроків – сходинок характеристики перетворення на кожному з піддіапазонів.

Основа логарифму  $\zeta$  на кожному піддіапазоні змінюється.

Значення основи логарифму при спадній розгортці залежить від мінімального значення вхідної напруги. Для зростаючої розгортки – від максимального значення вхідної напруги. Початкове значення компенсаційної напруги впливає на основу логарифму для обох розгортки. Необхідне значення  $\zeta$  фізично реалізовується зміною співвідношення ємностей конденсаторів.

Кожному з піддіапазонів відповідає окрема вага піддіапазону  $v_i$

Час перетворення можна визначити наступним чином:

$$t_n = \sum_{i=1}^m n_i \cdot T_T, \quad (7)$$

На основі проведених досліджень загальних принципів аналого-цифрового функціонального перетворення із змінною основою логарифма авторкою було запропоновано новий метод логарифмічного аналого-цифрового функціонального перетворення. Сутність цього методу ілюструють наведені на рис.5 епюри напруг.

Запропонований метод логарифмічного аналого-цифрового функціонального перетворення полягає у особливій реалізації процесу зрівноваження, в якому розбивають діапазон перетворення на піддіапазони і в

процесі перетворення формують компенсуючу напругу  $U_k$  шляхом зміни заряду на накопичуючому конденсаторі періодично повторюваними дозованими кількостями електрики, причому на першому піддіпазоні задають початкове значення компенсуючої напруги  $U_k$  рівним еталонній напрузі  $U_0$  і змінюють рівень компенсуючої напруги  $U_k$  до переходу через рівень вхідного сигналу, після чого проводять перехід на другий піддіпазон, вибирають значення ваги  $v_c$  будь-якого  $c$ -піддіпазону згідно формули  $v_c = a^{m-c}$ , де  $a$  – будь-яке додатне число, яке повинно бути більшим від одиниці,  $m$  – номер останнього піддіпазону, задають значення основи логарифма  $\zeta_c$ , що визначає дозовані кількості електрики на будь-якому  $c$ -піддіпазоні, підраховують число дозувань  $n_c$  і добуток числа дозувань на вагу цього піддіпазону та визначають результат перетворення як алгебраїчну суму одержаних добутоків, причому запам'ятовують останній рівень компенсуючої напруги на кожному піддіпазоні, проводять перехід з  $c$ -го піддіпазону на наступний  $(c+1)$ -ий піддіпазон після переходу рівня компенсуючої напруги  $U_k$  через заданий рівень, в якості якого використовують останній рівень компенсуючої напруги на  $(c-1)$ -му піддіпазоні, початкове значення компенсуючої напруги на  $c$ -му піддіпазоні задають рівним останньому рівню компенсуючої напруги на  $(c-2)$ -му піддіпазоні, а початкове значення компенсуючої напруги на другому піддіпазоні задають рівним вхідному сигналу.

Особливість запропонованого методу логарифмічного аналого-цифрового функціонального перетворення полягає у тому, що при перетворенні використовують рівні компенсуючих напруг, які є на накопичуючих конденсаторах конденсаторних комірок кожного піддіпазону. Співвідношенням ємностей конденсаторних комірок задають допустиме значення похибки перетворення на кожному піддіпазоні. При переході на наступний піддіпазон змінюють порядок підведення до компаратора порівнюваних напруг, внаслідок чого з кожним піддіпазоном похибку перетворення зменшують аж до досягнення на останньому піддіпазоні заданого значення.

Остаточно, результат перетворення на  $m$ -піддіпазонах

$$N = \frac{v_1}{\log \zeta_1} \log \frac{U_{\text{вх}}}{U_0} - \frac{v_2}{\log \zeta_2} \log \frac{U_{o_1}}{U_{\text{вх}}} + \sum_{c=3}^m (-1)^{c-1} \frac{v_c}{\log \zeta_c} \log \frac{U_{o_{c-1}}}{U_{o_{c-2}}}, \quad (8)$$

де  $U_{o_c}$  – останнє значення компенсаційної напруги на  $c$ -піддіпазоні ( $c=3, 4, 5, \dots, m$ ).

Останній рівень компенсаційної напруги на  $m$ -піддіпазоні

$$U_{o_m} = \zeta_m^{n_m} U_{o_{m-1}}, \quad (9)$$

причому абсолютна похибка перетворення не перевищує останнього приросту компенсаційної напруги на  $m$ -піддіпазоні, тобто

$$\Delta_m = \zeta_m^{n_m - 1} (\zeta_m - 1) U_{o_{m-1}}. \quad (10)$$

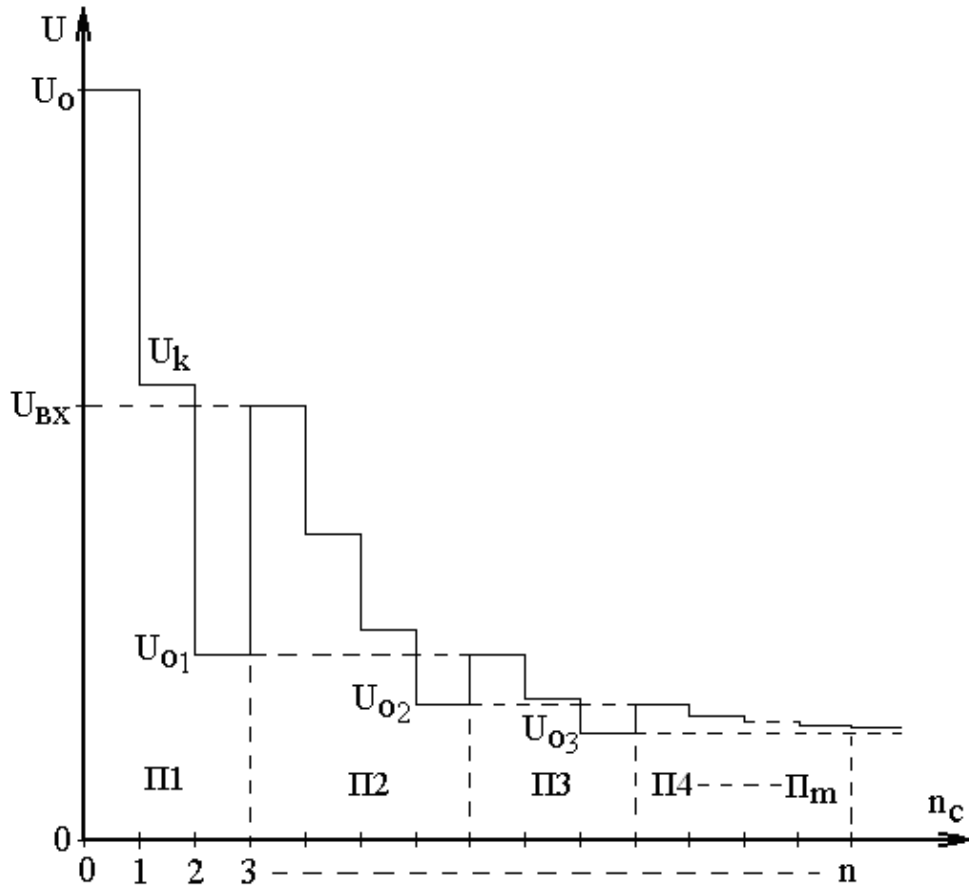


Рис.5. Епюри напруг, що ілюструють сутність запропонованого методу логарифмічного аналого-цифрового функціонального перетворення із змінною основою логарифма

За рахунок виключення проміжних потактових запам'ятовувань компенсаційної напруги значно збільшена швидкодія АЦФП за запропонованим методом порівняно з аналогами. В загальному, для збільшення точності перетворення треба збільшувати кількість піддіапазонів, а для підвищення швидкодії – зменшувати кількість дозувань  $n_c$  шляхом збільшення ваги  $v_c$  і зменшення значення основи логарифму  $\zeta_c$  на  $c$ -піддіапазоні.

Новий принцип побудови інтерполюючих логарифмічних аналого-цифрових перетворювачів. Запропонований принцип дії інтерполюючих логарифмічних АЦП базується на явищі перозподілу заряду на етапі грубого перетворення і явищі накопичення заряду на етапі точного перетворення. Суть принципу дії ілюструють наведені на рис.6 епюри напруг.

Задаючи допустиме значення відносної похибки квантування на етапах E1 і E2, значення основ логарифму знаходимо як:

$$\zeta = \frac{1}{1 + \delta_{1д}} \quad \text{і} \quad \alpha = \frac{1}{1 - \delta_{2д}}. \quad (11)$$

Зауважимо, що при цьому абсолютна похибка перетворення ( $\Delta$ ) рівна різниці між передостаннім рівнем компенсаційної напруги на другому етапі ( $U_2$ ) та вхідним сигналом  $\Delta = U_2 - U_{ВХ}$  і не перевищуватиме значення

$$\Delta = \delta_{2_d} * U_{ВХ}. \quad (12)$$

Задаючи допустимі значення похибок на етапах перетворення E1 і E2, наприклад  $\delta_{1_d} = 10\%$  і  $\delta_{2_d} = 0,1\%$ , отримаємо максимальні кількості імпульсів на етапах  $N1=100$  і  $N2=100$ , а час перетворення  $t_n \leq T_T \cdot (N1 + N2)$ , де  $T_T$  - період повторення тактових імпульсів.

В загальному результат перетворення за цим методом буде рівний

$$N = \frac{\delta_{1_d}}{\delta_{2_d}} \cdot N1 + N2 = \frac{\delta_{1_d}}{\delta_{2_d}} \cdot \frac{1}{\ln \zeta} \ln \frac{U_{ВХ}}{U_0} + \frac{1}{\ln \alpha} \ln \frac{U_{ВХ}}{U_1}. \quad (13)$$

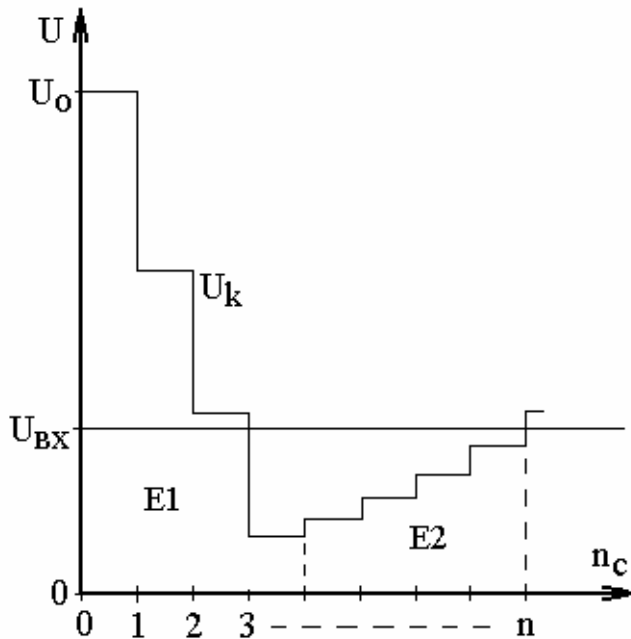


Рис.6. Епюри напруг, що ілюструють запропонований принцип дії інтерполюючих ЛАЦП

Отже,

запропонований новий принцип побудови інтерполюючих ЛАЦП, що базується на перерозподілі та накопиченні заряду і дає змогу: розширити клас інтерполюючих ЛАЦП та, виключивши проміжний такт відтворення попереднього значення компенсаційної напруги, збільшити в 1,5 – 2 рази точність ЛАЦП при збереженні швидкодії як і у кращих аналогів.

У третьому розділі розроблено алгоритми функціонування до запропонованих авторкою методів, викладених у розділі 2, та проведено комп'ютерне моделювання роботи перетворювачів, побудованих за цими методами. Моделюванням встановлено наступне.

1. Багатофункціональний АЦФП має головною перевагою велику кількість входів. Досліджені варіанти 5ти та 10ти входних напруг в діапазоні від 1 мВ до 10 В. Збільшення числа входних напруг не призводить до збільшення похибки перетворення. Багатофункціональний багатовходовий АЦФП відноситься до високоточних перетворювачів з середньою швидкодією. При заданій розрядності АЦФП він забезпечує точність на 1 – 2 двійкові розряди вищу. Час перетворення сотні мікросекунд – одиниці мілісекунд при заданій розрядності 10 і одиниці мілісекунд – десятки мілісекунд при заданій розрядності 12.

2. Перетворювач з логарифмуванням різниці двох напруг забезпечує точність вищу від класичного перетворювача, який спочатку отримує різницю та потім її логарифмує. Він відноситься до високоточних перетворювачів середньої швидкодії. Перевагою його є сам метод перетворення. Похибка запропонованого перетворювача порівняно з класичним є від 4 до 10 разів меншою для вхідних напруг, що відрізняються менше ніж на 10 %; при більшій різниці між вхідними напругами значення похибки зменшується. Час перетворення є від сотень мікросекунд до одиниць мілісекунд. Зведена похибка вихідного коду для 10ти розрядного перетворювача знаходиться в межах 0.02 % – 0.03 %, а для 12ти розрядного – 0.004% – 0.007%. Тобто є відповідною до похибок перетворювачів із розрядністю більшою на 2 розряди.

3. Вдосконалений рекурентний АЦФП має наступні переваги: бажана точність визначається основою логарифму і може бути задана користувачем ще до початку роботи; отримано підвищену точність при зменшеній розрядності; підвищено швидкодію порівняно з відомими аналогами.

Зокрема, якщо пріоритетом є швидкодія:

- для 8ми розрядів можна отримати: для основи логарифма 0.9975 похибку напруги меншу 0.25 % і похибку вихідного коду меншу 0.026 % при часі перетворення меншому від 85 мкс; і для основи логарифма 0.9990 похибку напруги меншу 0.1 % і похибку вихідного коду меншу 0.01 % при часі перетворення меншому від 195 мкс;

- для 10ти розрядів можна отримати: для основи логарифма 0.99975 похибку напруги меншу 0.025 % і похибку вихідного коду меншу 0.003 % при часі перетворення меншому від 203 мкс; і для основи логарифма 0.9999 похибку напруги меншу 0.01 % і похибку вихідного коду меншу 0.002 % при часі перетворення меншому від 473 мкс;

- не тільки швидкодія, але й точність перетворення вдосконаленого рекурентного АЦФП є вищою від аналогів у 5 разів.

Якщо пріоритетом є підвищення точності, то можна досягнути підвищення на 4 або 6 двійкових розрядів. Оптимальним за співвідношенням точність – швидкодія можна вважати підвищення точності на 4 розряди.

4. АЦФП із змінною основою логарифма має наступні переваги: бажана швидкодія визначається користувачем при заданні кількості дозувань; вибір точності можна задати кількістю піддіапазонів.

Моделюванням роботи аналого-цифрового функціонального перетворювача встановлено: похибка не перевищує 0,005 % при 10 дозуваннях на кожному з 4 піддіапазонів; час перетворення менший 100 мкс, що менше 40 періодів тактових імпульсів.

Зміна основи логарифма спадною розгорткою може бути рекомендована для вхідних напруг верхньої частини діапазону, а зростаючою розгорткою – для малих вхідних напруг. Зміна основи логарифма з двосторонньою розгорткою є універсальною в застосуванні та рекомендується для будь-яких значень вхідних величин. Перетворювачі на основі розроблених алгоритмів за

швидкодією перевищують відомі логарифмічні АЦП, а за точністю відповідають кращим з відомих аналогів.

Вдосконалений АЦФП із змінною основою логарифма має, окрім вище вказаних, ще наступні переваги.

При перетворенні на 4х піддіапазонах у діапазоні вхідних напруг від 1 мВ до 1 В його похибка є меншою від 0.03 %. А в діапазоні 1 В – 10 В він відповідає високоточним перетворювачам з 14ма двійковими розрядами, оскільки його похибка знаходиться в межах 0.001 % – 0.007 %.

Швидкодія вдосконаленого АЦФП із змінною основою логарифма перевищує не тільки відомі аналоги, але і класичні перетворювачі із змінною основою логарифма. Оскільки, найбільшу тривалість перетворення викликають значення на краях діапазону вхідних напруг, але час перетворення для всіх вхідних напруг не перевищує 65 мкс (26 тактів).

При перетворенні на 5ти піддіапазонах основа логарифму для п'ятого піддіапазону  $\zeta=0.9999$ . Зведена похибка вихідного коду вдосконаленого АЦФП із змінною основою логарифма не перевищуватиме 0.001 % в усьому діапазоні вхідних напруг, а саме від 1 мВ до 10 В. Час перетворення не перевищує 105 мкс (42 такти).

Отже, вдосконалений АЦФП із змінною основою логарифма є високоточним швидкодіючим перетворювачем.

5. Інтерполуючий перетворювач відноситься до високоточних пристроїв, оскільки його точність і швидкодію перетворення порівняно з відомими аналогами підвищено не менше як вдвічі, а для окремих піддіапазонів роботи покращено одночасно і точність, і швидкодію більше ніж у два рази.

Моделюванням встановлено, що зведена похибка вихідного коду інтерполуючого АЦФП є меншою від заданої на другому етапі перетворення в 4 – 5 разів. І не перевищує 0.022 % при заданій 0.1 %, 0.01 % при заданій 0.05 % і 0.0022 % при заданій 0.01 %.

Тривалість перетворення інтерполуючих АЦФП при зменшенні вдвічі заданих значень похибок на етапах перетворення 10 % і 0.1 % та 5 % і 0.05 % зростає удвічі у діапазоні мілівольт, а в діапазоні вхідних напруг більших від 1 В тривалість для цих обох випадків суттєво не відрізняється і менша від 300 мкс. А для заданих похибок 10 % і 0.001 % тривалість зростає у 4 рази і може досягати 2 мс.

Вибраний, як оптимальний, запропонований інтерполуючий перетворювач з підвищеною до 0.05 точністю навіть у діапазоні 1 мВ – 1 В відповідає типовій швидкодії відомих інтерполуючих перетворювачів з нижчою (до 0.1) точністю, а у діапазоні 1 В – 10 В демонструє швидкодію удвічі кращу при підвищеній точності.

У четвертому розділі проведено моделювання впливу шумів і завад на аналого-цифрові функціональні перетворювачі (АЦФП) на комутованих конденсаторах.

Проведене дослідження впливу різних шумів на АЦФП на КК дало змогу виявити: домінуючий вплив мають такі шуми як тепловий і дробовий. Флікер-

шумом в більшості практичних застосувань можна знехтувати, оскільки АЦФП звичайно працюють на частотах понад 10 кГц. Для зручності дослідження та оцінки рівня шумів використано такий відомий спеціальний параметр як ефективна шумова температура.

Моделювання впливу шумів на АЦФП з перерозподілом заряду. У кожному такті перетворення АЦФП з перерозподілом заряду матимуть місце чотири фази роботи (Ф1-Ф4), кожна з яких визначатиме вигляд моделі АЦФП: Ф1) перерозподіл заряду між дозуючим і накопичуючим конденсаторами; Ф2) перша пауза; Ф3) розряд дозуючого конденсатора; Ф4) друга пауза. Проміжні фази Ф2 і Ф4 на шум не впливають.

Шумова модель АЦФП для фази Ф3 наведена на рис.7.

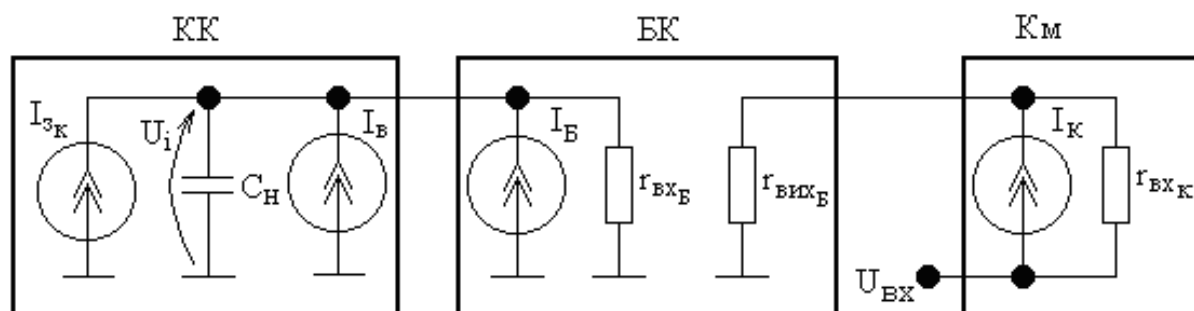


Рис.7. Шумова модель АЦФП з ПЗ (Ф3)

Визначивши шуми кожного з функціональних вузлів АЦФП у фазі Ф3, знаходимо шум на вході АЦФП з перерозподілом заряду як середньгеометричне знайдених шумів конденсаторної комірки, буферного каскаду та компаратора:

$$U_{ш\text{ЛАЦП}} = \sqrt{e_{ш\text{КК}}^2 + U_{бк}^2 + U_{км}^2} = \sqrt{(10,4 \cdot 10^{-6})^2 + (168 \cdot 10^{-6})^2 + (139 \cdot 10^{-6})^2} = 218 \text{ мкВ} \quad (15)$$

Таким чином, у фазі Ф3 шуми на вході АЦФП з перерозподілом заряду складають 218 мкВ.

Аналогічно визначено шуми АЦФП у фазі Ф1 і встановлено, що вони теж не перевищують 218 мкВ. Співвідношення сигнал/шум (с/ш) становить 93 дБ.

Модель АЦФП з перерозподілом заряду, яка враховує шуми елементів Ф1 наведена на рис.8.

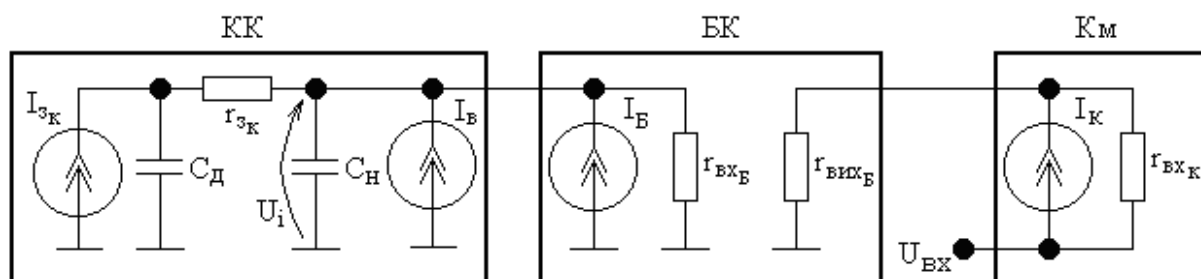


Рис.8. Шумова модель АЦФП з ПЗ (Ф1)



Наведені вище оцінки шумів базуються на паспортних даних елементів схеми АЦФП на комутованих конденсаторах. З метою оцінки відхилення параметрів від паспортних було проведено комп'ютерне моделювання шумів, результати якого показали, що повний шум на вході АЦФП з перерозподілом заряду у фазах Ф1 і Ф3 не перевищує: а) 231 мкВ (с/ш=92 дБ) для вхідних струмів до 30 нА (розбіжність із значенням для паспортних даних становить 10 %); б) 281 мкВ (с/ш=91 дБ) для вхідних струмів до 80 нА (розбіжність із значенням для паспортних даних становить 29 %).

Моделювання впливу шумів на АЦФП з накопиченням заряду у паралельних пасивних конденсаторних комірках. У кожному такті перетворення АЦФП з накопиченням заряду матимуть місце чотири фази роботи (Ф1 – Ф4), кожна з яких визначатиме вигляд моделі АЦФП: Ф1) накопичення заряду конденсатором  $C_H$ ; Ф2) перша пауза; Ф3) заряд дозуючого конденсатора  $C_D$ ; Ф4) друга пауза.

Аналогічно попередньому з точки зору оцінки впливу шумів важливими для роботи АЦФП є фази Ф1 (накопичення заряду конденсатором  $C_H$ ) і Ф3 (заряд дозуючого конденсатора  $C_D$ ), оскільки фази Ф2 і Ф4 – це паузи.

Шумова модель АЦФП для фази Ф3 наведена на рис.9.

Повний шум АЦФП з накопиченням заряду на паралельних пасивних конденсаторних комірках у фазі Ф3

$$U_{\text{шЛАЦП-НЗпар}}(\text{Ф3}) = \sqrt{e_{\text{шкк}}^2 + U_{\text{БК}}^2 + U_{\text{КМ}}^2 + U_{\text{ДОН}}^2 + U_{\text{СВ}}^2} = 273 \text{ мкВ} \quad (16)$$

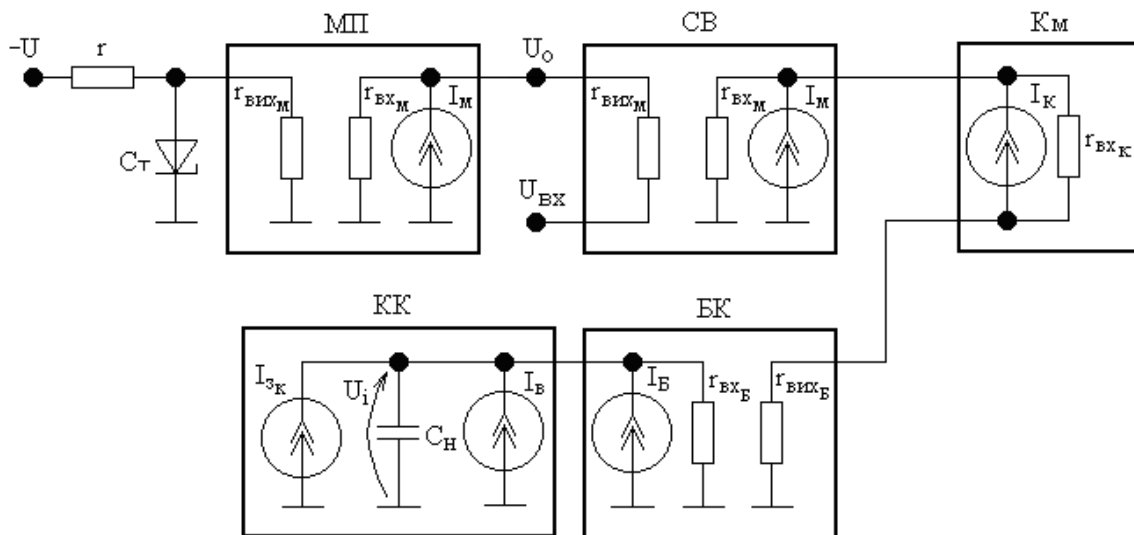


Рис.9. Шумова модель АЦФП з НЗ у паралельних пасивних КК (Ф3)

Аналогічно знаходимо, що шум АЦФП у фазі Ф1 такий же як і фазі Ф3.

Остаточно робимо висновок, що шуми на вході АЦФП з накопиченням заряду на паралельних пасивних конденсаторних комірках не перевищуватимуть 273 мкВ (с/ш=91 дБ).

Моделювання впливу шумів на АЦФП з накопиченням заряду у послідовних пасивних конденсаторних комірках проводимо аналогічно і знаходимо, що шуми на їх вході теж не перевищуватимуть 273 мкВ (с/ш=91 дБ).

Підсумовуючи проведене моделювання впливу шумів на АЦФП на пасивних конденсаторних комірках можна зробити наступні висновки:

1. Порівнюючи АЦФП з накопиченням заряду у паралельних і послідовних пасивних конденсаторних комірках, бачимо, що їх шуми однакові та не перевищують 273 мкВ (с/ш=91 дБ).

2. Шуми у АЦФП з перерозподілом заряду на перевищують 218 мкВ (с/ш=93 дБ) і є меншими ніж у АЦФП з накопиченням заряду у пасивних конденсаторних комірках.

Моделювання впливу шумів на АЦФП на активних конденсаторних комірках. Аналогічно попередньому для оцінки шумів АЦФП на активних КК важливими є фази Ф1 (заряд конденсатора С1) і Ф3 (заряд конденсатора С2).

Шумова модель АЦФП з накопиченням заряду на активній конденсаторній комірці для фази Ф3 відрізняється від моделі АЦФП з перерозподілом заряду рис.7 наявністю масштабного перетворювача МП між буферним каскадом БК і компаратором Км. Тому шум АЦФП на активній конденсаторній комірці буде збільшений порівняно з АЦФП рис.7 на шум масштабного перетворювача МП.

Знаходимо шум на вході АЦФП з накопиченням заряду на активній конденсаторній комірці у фазі Ф3 як середньоквадратичне знайдених шумів конденсаторної комірки, буферного каскаду, масштабного перетворювача та компаратора:

$$U_{\text{шЛАЦП}} = \sqrt{e_{\text{шКК}}^2 + U_{\text{БК}}^2 + U_{\text{МП}}^2 + U_{\text{КМ}}^2} = 246 \text{ мкВ} \quad (17)$$

Аналогічно знаходимо, що шуми АЦФП з накопиченням заряду на активній конденсаторній комірці у фазі Ф1 рівні шумам у фазі Ф3, тобто 246 мкВ (с/ш=92 дБ).

Мінімізація завад у АЦФП на комутованих конденсаторах. Існує багато різних видів завад, але в промислових умовах найбільший вплив має періодична завада частотою 50 Гц. На рис.10 наведено функціональну схему розробленого пристрою для мінімізації завад, де П – перемикач, ПН – повторювач напруги, ОВ – одновібратор, Км – компаратор.

Вхідний сигнал є сумою постійної складової (корисний сигнал) і змінної складової (завад імпульсної та періодичної).

Конденсатором С1 придушуються імпульсні завади, оскільки для них опір С1 набагато менший опору схеми у вузлі А.

Вплив періодичних завад мінімізується вимкненням ключів К1 і К2 перемикача П при переході періодичної завади через нуль, внаслідок чого на запам'ятовуючому конденсаторі С3 буде записано значення постійної складової, тобто корисний сигнал.

Абсолютна похибка записаної на С3 напруги ( $\Delta U$ ) при цьому буде визначатися часом спрацювання компаратора ( $t_{\text{КМ}}$ ) і часом вимкнення ключів

K1 і K2 ( $t_k$ ). Для компаратора K554CA3A  $t_{км} \leq 0.3\text{мкс}$ , а для ключів K590KH13  $t_k \leq 0.05\text{мкс}$ .

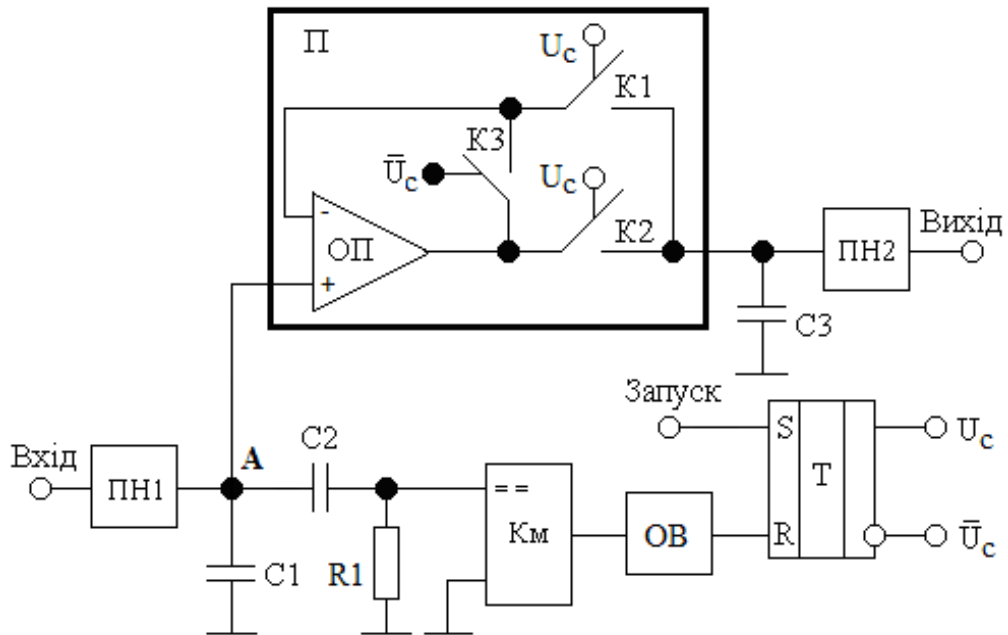


Рис.10. Функціональна схема вхідного пристрою, що мінімізує вплив періодичних завад

Подаючи періодичну заваду синусоїдою  $U_3 = A_3 \sin 2\pi Ft$ , визначаємо абсолютну похибку як

$$\Delta U = A_3 \sin 2\pi F(t_{км} + t_k), \quad (18)$$

де  $t = t_{км} + t_k$ .

При амплітуді завади  $A_3 = 100\text{ мВ}$  і частоті  $F = 50\text{ Гц}$  абсолютна похибка відтворення вхідного (корисного) сигналу на C3 не перевищуватиме  $0.2\text{ мкВ}$ .

Отже, розроблена схема забезпечує високий коефіцієнт придушення періодичної завади (114 дБ).

**П'ятий розділ** присвячено використанню запропонованих нових методів перетворення для побудови оригінальних структурних і функціональних схем аналого-цифрових функціональних перетворювачів, зокрема, багатофункціональних, перетворювачів для визначення різниці, із змінною основою логарифму, рекурентних, інтерполюючих, з накопиченням заряду та імпульсним від'ємним зворотним зв'язком, і використанню їх в розробках і фізичному моделюванні.

Переважає більшість запропонованих структур АЦФП захищена патентами на винаходи.

Наведено результати експериментальних досліджень макетних зразків АЦФП для діапазону вхідних сигналів від  $1\text{ мВ}$  до  $10\text{ В}$ , причому вихідний сигнал – двійковий код або напруга постійного струму номінальним значенням  $10\text{ В}$ . Дано рекомендації щодо реалізації АЦФП і покращання їх параметрів і характеристик.

### Багатофункціональні аналого-цифрові перетворювачі.

Запропоновані нами багатофункціональні аналого-цифрові перетворювачі вперше дали змогу реалізувати в них десять входів навідрізнено від відомих аналогів, у яких кількість входів не перевищує три – чотири.

Основні виконувані функції – множення, ділення, піднесення до N-го степеня і добування кореня N-го степеня; показник степеня рівний кількості входів

- Універсальний багатофункціональний аналого-цифровий перетворювач (Патент 114064 Україна) [48]. Основна похибка перетворення не більша 0,05%, а час перетворення не перевищує 7мс.

- Покращений багатофункціональний аналого-цифровий перетворювач рис.11 (Заявка № а201805976 Україна) [50], де позначено: БК – блок керування,

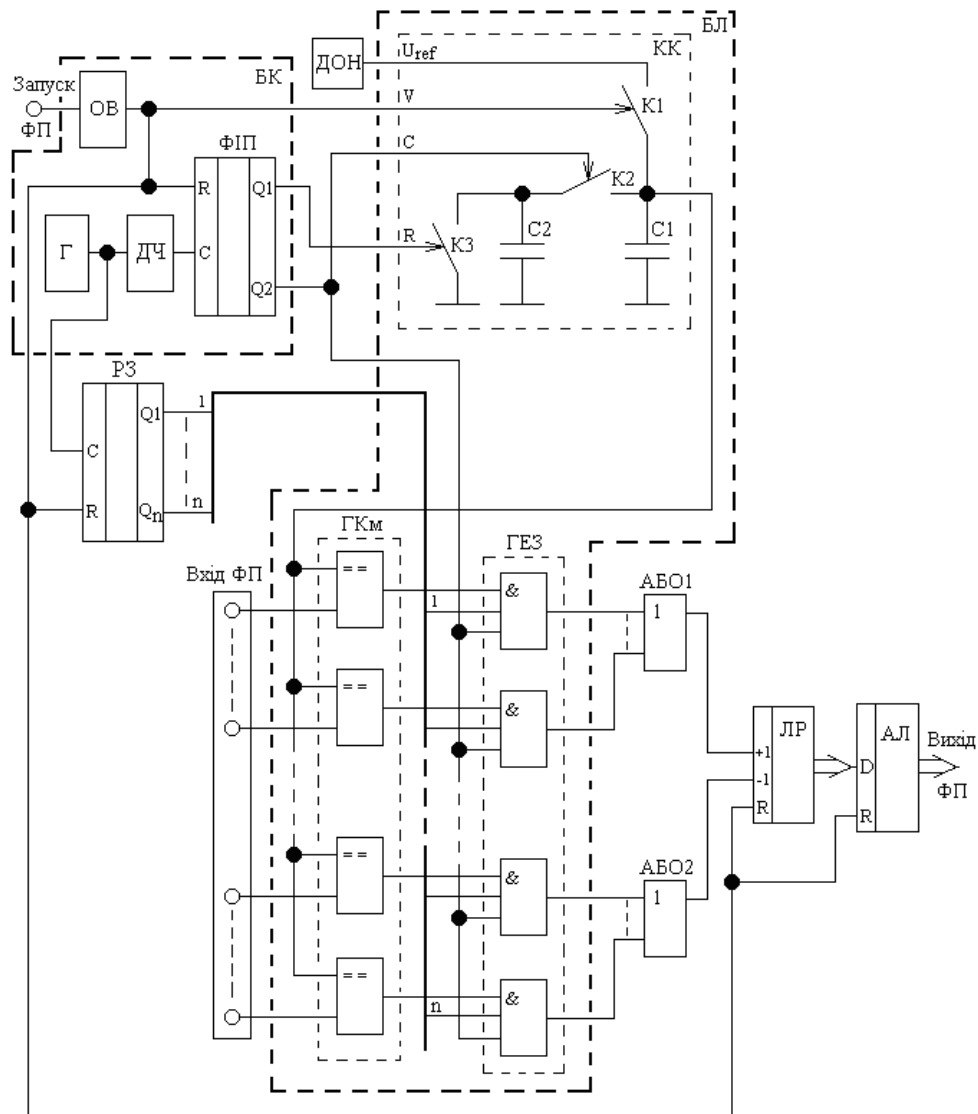


Рис.11. Функціональна схема покращеного багатофункціонального аналого-цифрового перетворювача

ДОН – джерело опорної напруги, БЛ – блок логарифматорів, РЗ – регістр зсуву, ЛР – лічильник реверсивний, АЛ – антилогарифматор, ДЧ – дільник частоти,

ФІП – формувач імпульсних послідовностей, ГКом – група компараторів, ГЕЗ – група елементів збігу.

Має такі ж характеристики як і універсальний багатфункціональний аналого-цифровий перетворювач, але спрощену реалізацію та вищу надійність роботи.

- АБФП типу N-логарифматорів-антилогарифматор на двох конденсаторних комітках (Патент 57054 Україна) [45]. Основна похибка перетворення не більша 0,15%.

- АБФП типу N-логарифматорів-антилогарифматор на одній конденсаторній комітці (Патент 89229 Україна) [46]. Основна похибка перетворення менша 0,1%.

Аналого-цифровий функціональний перетворювач для визначення логарифма різниці двох напруг рис.12 (Патент України 116938) [51].

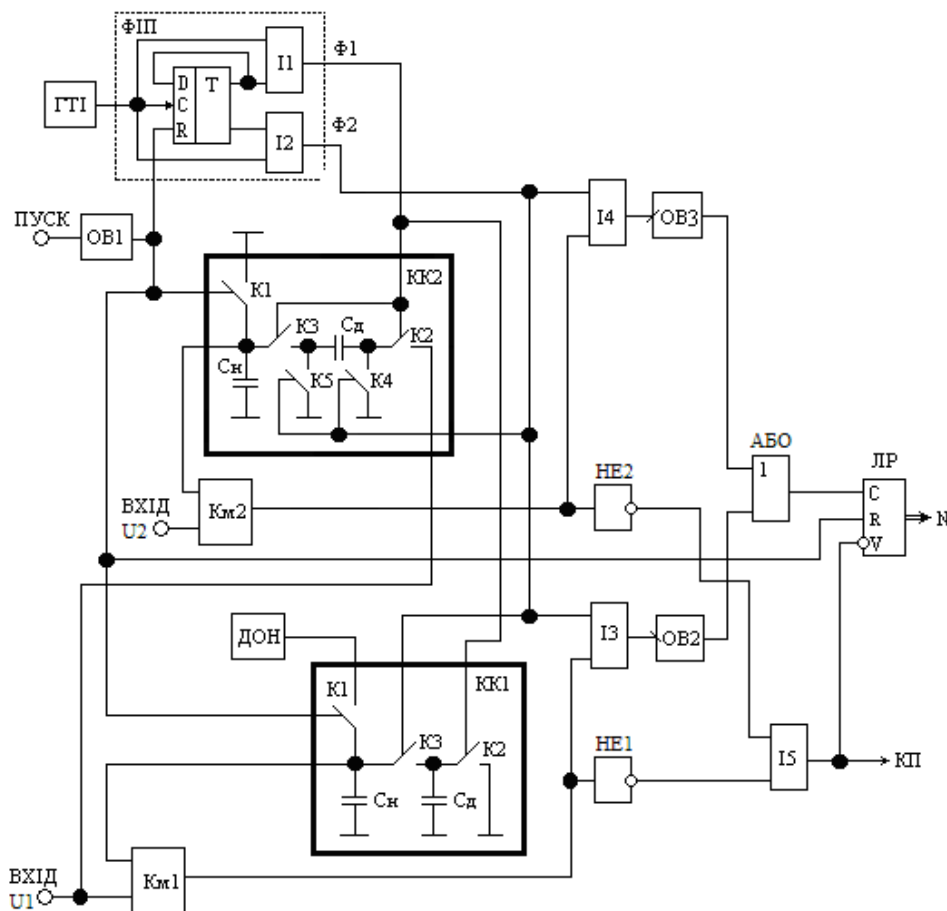


Рис.12. Функціональна схема пристрою, що реалізує метод логарифмічного аналого-цифрового перетворення різниці двох напруг

При вхідних напругах порядку одиниць вольт і їх різниці 10% – 2.5% похибка визначення класичним перетворювачем становить відповідно 1% – 4%, а – запропонованим 10ти розрядним АЦФП 0.1% – 0.3%, тобто запропонований АЦФП практично у 10 разів точніший від аналога і ця порівняльна точність збільшується із зменшенням різниці між вхідними напругами. Тривалість перетворення є від сотень мікросекунд до одиниць мілісекунд.

Характеристики АЦФП в основному визначаються властивостями використаних в ньому ЛАЦП з перерозподілом і накопиченням заряду.

Зменшене – ЛАЦП з ПЗ: результуюча похибка перетворення (з урахуванням похибки квантування 0,1%) не перевищує 0,15%, а час перетворення не більший 10 мс.

Від’ємник – ЛАЦП з НЗ: результуюча похибка перетворення (з урахуванням похибки квантування 0,1%) не перевищує 0,15%, а час перетворення менший 10 мс.

Вдосконалений аналого-цифровий функціональний перетворювач із змінною основою логарифма рис.13 (Заявка № а201806835 Україна) [52]:

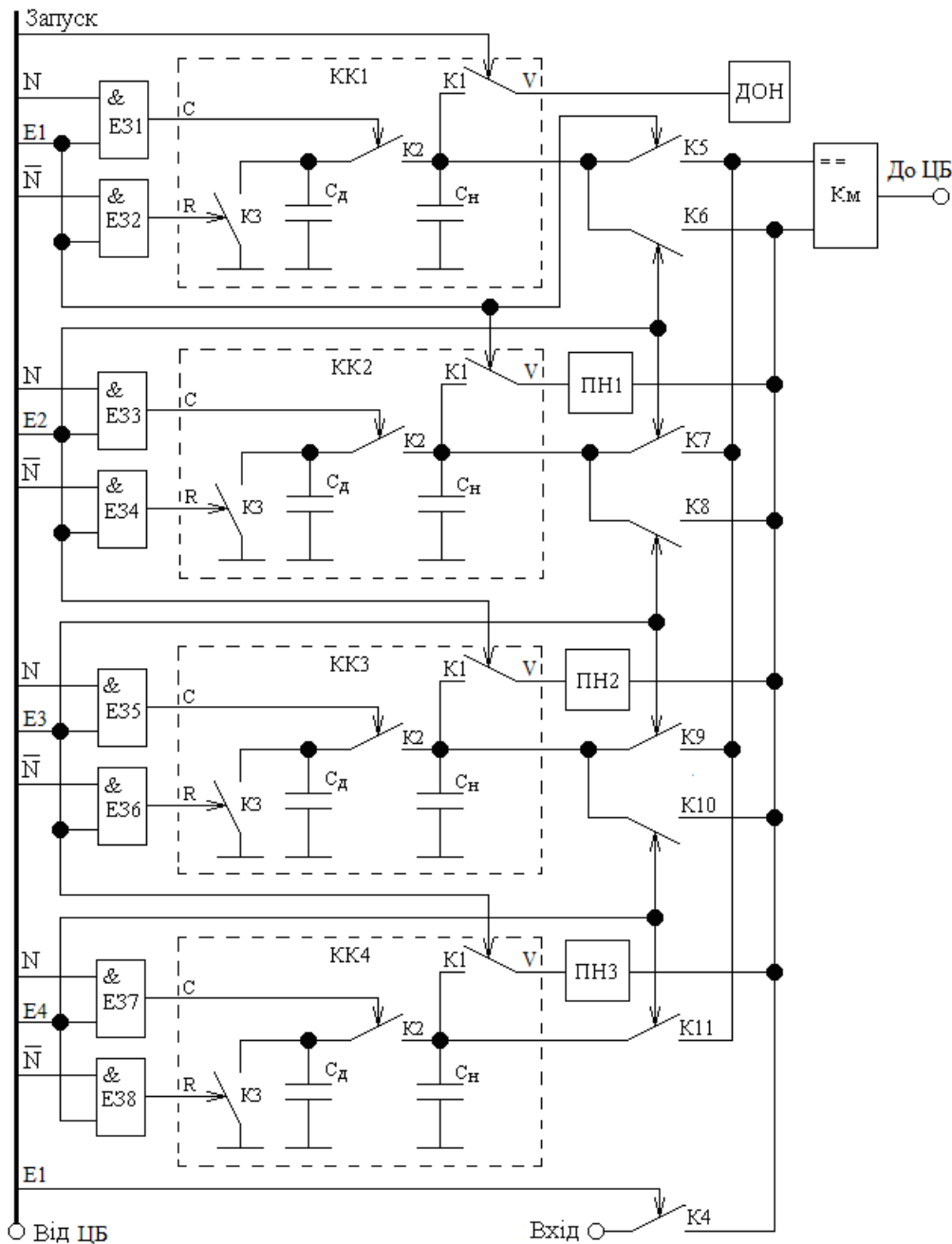


Рис.13. Функціональна схема аналогового блоку пристрою, що реалізує метод логарифмічного аналого-цифрового функціонального перетворення із змінною основою логарифма

при чотирьох піддіапазонах похибка квантування не перевищує 0,006%, а час перетворення менший 65 мкс.

Покращений рекурентний аналого-цифровий функціональний перетворювач рис.14 (Патент 113138 Україна) [47], де позначено: БФПФ – блок формування показникової функції, РМП – регульований масштабний перетворювач, АК – аналоговий комутатор, БК – буферний каскад, РР – регістр результату, ЛР – лічильник результату.

При 8ми розрядах перетворювача забезпечена похибка перетворення 0.1 % (що відповідає 10ти двійковим розрядам) за час перетворення не більший 90 мкс.

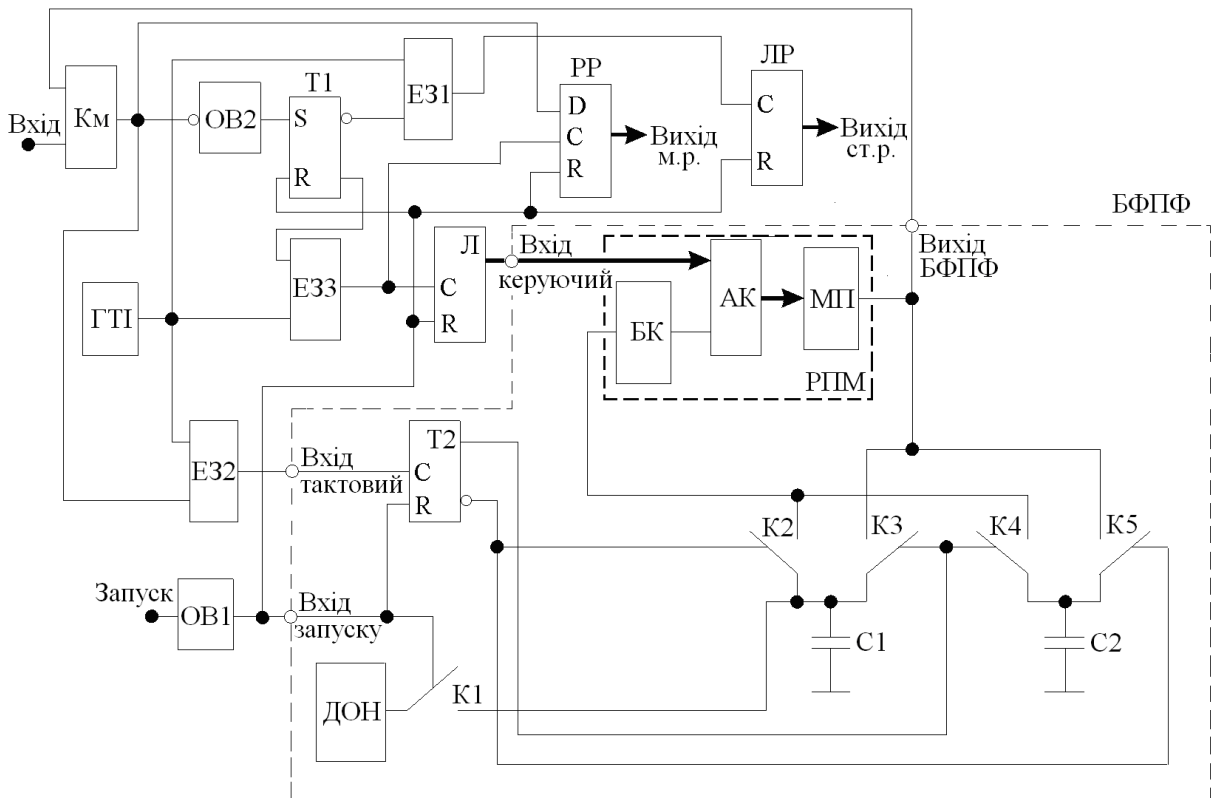


Рис.14. Функціональна схема запропонованого покращеного рекурентного аналого-цифрового функціонального перетворювача

Новий інтерполюючий логарифмічний аналого-цифровий перетворювач: основна похибка перетворення не перевищувала 0.05% при часі перетворення меншому від 500 мкс.

Покращений логарифмічний АЦП з накопиченням заряду з імпульсним від'ємним зворотним зв'язком (Patent 227862 Polska) [49].

Експериментальні дослідження розроблених ЛАЦП з накопиченням заряду з імпульсним зворотним зв'язком в діапазоні вхідних сигналів 1мВ – 10В постійної напруги при похибці квантування 0,1% показали, що результуюча похибка перетворення не перевищує 0,1%, тобто практично повністю визначається значенням похибки квантування, а час перетворення менший 20 мс.

## ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертаційній роботі на основі виконаних авторкою досліджень започатковано нові та розвинуто відомі теоретичні та практичні засади в питаннях функціонального перетворення аналогових сигналів, завдяки чому вирішена науково-прикладна проблема, яка має важливе народно-господарське значення і полягає у розробленні методологічних засад побудови, створенні нових методів, математичних моделей, алгоритмів і засобів на комутованих конденсаторах з метою розширення функціональних можливостей, підвищення точності та швидкодії.

1. На основі проведеного огляду та аналізу сучасного стану побудови аналого-цифрових і функціональних перетворювачів показано на перспективність поєднання їх властивостей у пристроях на основі комутованих конденсаторів.

2. Вперше розроблено методологічні засади побудови АЦФП на комутованих конденсаторах, які поєднують структурні – шляхом зміни основи логарифмування і співвідношення ємностей, та алгоритмічні – шляхом вибору числа піддіапазонів перетворення, кількості та величини кроків на кожному з них, що відкриває нові можливості підвищення точності та швидкодії АЦФП.

3. Вперше запропоновано новий метод аналого-цифрового функціонального перетворення, який завдяки формуванню компенсаційної напруги на виході конденсаторної комірки шляхом перерозподілу заряду та її подачі одночасно на відповідні входи всіх логарифматорів, які поділені на дві групи, причому протягом тривалості імпульса перерозподілу підключаються по чергово входи кожного логарифматора першої та другої групи відповідно до входу додавання та віднімання реверсивного лічильника, внаслідок чого на виході лічильника отримується алгебраїчна сума вихідних число-імпульсних кодів логарифматорів, дає змогу побудувати багатфункціональні багатовходові АЦФП з підвищеною швидкістю та з його допомогою:

а) отримати алгебраїчну суму вихідних кодів логарифматорів і реалізувати операції множення та ділення;

б) отримати суму вихідних кодів логарифматорів, на  $m$  закорочених входів першої групи яких подано вхідний сигнал  $U_{вх}$ , і забезпечити реалізацію степеневі функції з показником  $m$ , тобто  $U_{вх}^m$ ;

в) отримати різницю вихідних кодів логарифматорів, на  $p$  закорочених входів другої групи яких подано вхідний сигнал  $U_{вх}$ , і забезпечити реалізацію кореня з показником  $p$ , тобто  $\sqrt[p]{U_{вх}}$ .

4. Вперше запропоновано метод логарифмічного аналого-цифрового перетворення різниці двох вхідних напруг  $U_1 - U_2$ , який полягає у перетворенні різниці на добуток двох множників  $U_1 \cdot \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right)$  і визначенню результату як суми логарифмів цих множників, причому шляхом перерозподілу



заряду у першій конденсаторній комірці визначають логарифм першого множника, а шляхом накопичення заряду у другій пасивній конденсаторній комірці визначають логарифм другого множника, що дає змогу значно підвищити точність порівняно з традиційним підходом, коли спершу визначають різницю цих напруг, а потім її логарифмують.

5. Отримав подальший розвиток метод рекурентного аналого-цифрового функціонального перетворення, в якому вага старшого розряду використовується багатократно і в момент переходу компенсаційної напруги через рівень вхідного сигналу реєструється значення старших розрядів вихідного коду як добуток ваги старшого розряду на кількість використань цієї ваги (не рахуючи переходу), а значення молодших розрядів визначається як у відомому рекурентному методі. Завдяки цьому суттєво зменшується кількість зразкових величин і підвищується швидкодія перетворення.

6. Для подальшого розвитку методу побудови АЦФП із змінною основою логарифму, вперше запропоновано метод аналого-цифрового функціонального перетворення, в якому розбивають діапазон перетворення на піддіапазони і ступінчато змінюють компенсаційну напругу від початкового значення до заданого, зменшуючи з кожним наступним піддіапазоном крок квантування до отримання потрібного значення похибки перетворення, причому на першому піддіапазоні початкове значення компенсаційної напруги приймають рівним опорній нарузі та задане значення – рівним вхідній нарузі, а на кожному наступному піддіапазоні початкове значення приймають рівним заданому значенню попереднього піддіапазону та задане значення – рівним останньому значенню компенсаційної напруги попереднього піддіапазону. Це дало змогу спростити схемне рішення та підвищити точність аналого-цифрових функціональних перетворювачів, що реалізовані на основі запропонованого методу.

7. Запропоновано новий принцип дії інтерполюючих логарифмічних аналого-цифрових перетворювачів, який базується на явищі перозподілу заряду на етапі грубого перетворення і явищі накопичення заряду на етапі точного перетворення, що порівняно з відомими аналогами дало змогу спростити алгоритм і підвищити швидкодію перетворення завдяки виключенню необхідності відтворення на етапі грубого перетворення попереднього рівня компенсаційної напруги.

8. Отримав подальший розвиток метод логарифмічного аналого-цифрового перетворення з імпульсним зворотним зв'язком шляхом створення ідеального режиму роботи перетворювача напруга-струм внаслідок короткого замикання в процесі перетворення його виходу на шину нульового потенціалу, що дало змогу значно розширити динамічний діапазон вхідних сигналів і підвищити точність логарифмічних аналого-цифрових перетворювачів.

9. Вперше розроблено математичні моделі та алгоритми функціонального перетворення аналогових сигналів, які основані на запропонованих методах і дають змогу оцінити параметри розроблюваних АЦФП підчас їх проектування.

10. На основі проведеного комп'ютерного моделювання роботи АЦФП, побудованих за запропонованими методами, встановлено, що в діапазоні вхідних сигналів 80 дБ (від 1 мВ до 10 В):

- багатофункціональні АЦФП мають головною перевагою велику кількість входів (більше 10, тоді як у відомих аналогів не більше 3), відносяться до високоточних перетворювачів з середньою швидкодією: основна похибка перетворення не більша 0,1% при часі перетворення меншому 5,75мс;

- АЦФП з логарифмуванням різниці двох напруг забезпечують точність вищу в 5 – 10 разів від відомих перетворювачів, які спочатку отримують різницю, а потім її логарифмують. Ці АЦФП відносяться до високоточних перетворювачів середньої швидкодії: при задані основи логарифму  $\zeta=0.99502$  для близьких вхідних напруг (різниця їх менша 1В) отримуємо зведену похибку не більшу 0.1 % (у відомих перетворювачів більша 0,5%) при часі перетворення меншому 1,2мс, а при основі  $\zeta=0.999$  відповідно – 0.01% (проти 0,1% у відомих) при часі 9.25мс. При меншій різниці між вхідними напругами перевага у точності запропонованих АЦФП над аналогами зростає ще більше;

- вдосконалені рекурентні АЦФП мають порівняно з відомими аналогами підвищену точність при меншій розрядності та більшу швидкодію: для 8ми розрядних АЦФП похибка не перевищує 0.25 % при основі логарифма 0.9975 і 0.1% при основі логарифма 0.9990, а час перетворення менший 87,5 мкс.

- АЦФП із зміною основи логарифма мають наступні переваги: бажана швидкодія визначається користувачем при заданні кількості дозувань, а вибір точності можна задати кількістю піддіапазонів. Їх похибка не перевищує 0,005 % при 10 дозуваннях на кожному з 4 піддіапазонів, а час перетворення менший 100 мкс.

- запропоновані інтерполюючі перетворювачі відносяться до високоточних пристроїв: порівняно з аналогами їх похибка зменшена вдвічі (до 0.05%) при часі перетворення меншому 500мкс.

- покращені ЛАЦП з накопиченням заряду з імпульсним зворотним зв'язком мають результуючу похибку перетворення не більшу 0,1%, яка практично повністю визначається значенням похибки квантування, при часі перетворення меншому 20 мс.

11. Проведеним фізичним моделюванням розроблених за запропонованими методами АЦФП встановлено, що розбіжність між даними експериментальних досліджень макетних зразків і комп'ютерного моделювання АЦФП не перевищувала 8 – 10 %.

12. На основі проведеного аналізу шумів окремих елементів АЦФП розроблено схеми заміщення, за якими виконано розрахунок і математичне моделювання впливу шумів на АЦФП на комутованих конденсаторах. Встановлено, що значення шумів і співвідношення сигнал/шум (с/ш) на вході: а) АЦФП з перерозподілом заряду на пасивних конденсаторних комірках не перевищує 218 мкВ і с/ш = 93 дБ; б) АЦФП з накопиченням заряду на

паралельних і на послідовних пасивних конденсаторних комірках однакові та не перевищують 273 мкВ і с/ш = 91 дБ; в) АЦФП з накопиченням заряду на активних конденсаторних комірках не перевищує 246 мкВ і с/ш = 92 дБ; г) АЦФП з накопиченням заряду на пасивних конденсаторних комірках значно поступаються за шумами АЦФП з перерозподілом заряду та АЦФП з накопиченням заряду на активних конденсаторних комірках; д) для подальшого зниження рівня шумів у АЦФП слід використовувати малошумові компоненти.

13. Запропоновано і розроблено схему мінімізації впливу періодичної завади на роботу конденсаторної комірки, принцип дії якої базується на запам'ятовуванні вхідного сигналу в момент переходу завади через нуль і в подальшому відключенні входу АЦФП від джерела вхідного сигналу, внаслідок чого суттєво підвищується точність АЦФП. Схема забезпечує високий коефіцієнт придушення періодичної завади (114 дБ).

14. Результати дисертаційних досліджень впроваджено у розробках Національного університету «Львівська політехніка», зокрема:

– багатофункціональні АЦФП на комутованих конденсаторах у держбюджетній темі №д.р. 0102U001206;

– швидкодіючі інтерполяційні, рекурентні та багатофункціональні АЦФП на комутованих конденсаторах у держбюджетній темі №д.р. 0104U002297;

– багатоканальні АЦФП на комутованих конденсаторах з розширеними функціональними можливостями у держбюджетній темі №д.р. 0106U001343).

Розроблені та захищені патентами багатофункціональний і рекурентний АЦФП, а також алгоритми їх функціонування пройшли випробування та впроваджені у Львівському центрі Інституту космічних досліджень НАН та ДКА України, зокрема, при розробці апаратури для космічних досліджень, чим було підтверджено їх розширені функціональні можливості та належний рівень точності та швидкодії.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ

### ПРАЦІ, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мичуда Л. З. Аналого-цифровий багатофункціональний перетворювач / Л. З. Мичуда, З. Р. Мичуда. // Вісник НУЛП – Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. – 2002. – №460. – С. 66–72.

2. Мичуда Л. З. Інтерполюючий логарифмічний аналого-цифровий перетворювач / Л. З. Мичуда, З. Р. Мичуда, Б. О. Католик. // Вісник НУЛП – Автоматика, вимірювання та керування. – 2002. – №445. – С. 160–166.

3. Мичуда Л. З. Вимірювальний перетворювач ємність – код / Л. З. Мичуда, З. Р. Мичуда. // Вісник НУЛП – Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. – 2004. – №506. – С. 249–252.

4. Мичуда З. Р. Логарифмічні АЦП з перерозподілом заряду заряду. Моделювання впливу паразитних міжелектродних ємностей / З. Р. Мичуда, Л.

3. Мичуда, Б. О. Католик. // Збірник наукових праць «Комп'ютерні технології друкарства». – 2004. – №11. – С. 167–183.

5. Мичуда З. Р. Моделювання впливу струмів витікання в логарифмічних АЦП з накопиченням заряду в активних конденсаторних комірках / З. Р. Мичуда, Л. З. Мичуда, О. Р. Коструба. // Збірник наукових праць «Комп'ютерні технології друкарства». – 2004. – №11. – С. 183–190.

6. Оцінка динамічних властивостей логарифмічних АЦП на комутованих конденсаторах / Б. О.Католик, К. І. Ільканич, З. Р. Мичуда, Л. З. Мичуда. // Сборник научных трудов Национального горного университета. – 2004. – №19 т.2. – С. 135–143.

7. Мичуда З. Р. Аналоговий помножувач на основі частотної модуляції / З. Р. Мичуда, Л. З. Мичуда, Г. І. Влах. // Міжвідомчий збірник наукових праць «Відбір і обробка інформації». – 2004. – №20(96). – С. 64–68.

8. Мичуда З. Р. Новий метод логарифмічного аналого-цифрового перетворення / З. Р. Мичуда, Л. З. Мичуда, К. І. Ільканич. // Збірник наукових праць «Комп'ютерні технології друкарства». – 2004. – №12. – С. 220–224.

9. Мичуда З. Р. Моделювання впливу струмів витікання в логарифмічних АЦП з перерозподілом заряду / З. Р. Мичуда, Л. З. Мичуда. // Вісник НУЛП – Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. – 2005. – №537. – С. 103–106.

10. Оцінка точності логарифмічних АЦП на комутованих конденсаторах / З. Р.Мичуда, Л. З. Мичуда, О. Р. Коструба, К. І. Ільканич. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – №3. – С. 181–184.

11. Мичуда Л. З. Аналогові функціональні перетворювачі на комутованих конденсаторах для систем енергообліку / Л. З. Мичуда, З. Р. Мичуда. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – №3. – С. 184–186.

12. Влах Г. І. Аналого-цифровий перетворювач електроенергії / Г. І. Влах, З. Р. Мичуда, Л. З. Мичуда. // Науково-технічний журнал «Методи та прилади контролю якості», Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – 2005. – №13. – С. 80–82.

13. Підвищення точності та швидкодії логарифмічних аналого-цифрових перетворювачів / З. Р.Мичуда, Л. З. Мичуда, Б. О. Католик, О. Р. Коструба. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2006. – спецвипуск – С. 203–205.

14. Мичуда З. Р. Моделювання впливу паразитних міжелектродних ємностей в логарифмічних АЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках / З. Р. Мичуда, Л. З. Мичуда, У. С. Антонів. // Вісник НУЛП – Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. – 2008. – №617. – С. 163–170.

15. Мичуда З. Р. Паралельний логарифмічний аналого-цифровий перетворювач / З. Р. Мичуда, Л. З. Мичуда, О. Р. Коструба. // Збірник наукових праць «Комп'ютерні технології друкарства». – 2008. – №19. – С. 38–43.

16. Моделювання впливу паразитних міжелектродних ємностей в логарифмічних АЦП з накопиченням заряду з імпульсним від'ємним зворотним зв'язком / З. Мичуда, Л. Мичуда, У. Антонів, А. Шиманський. // Міжвідомчий збірник «Вимірювальна техніка і метрологія». – 2010. – №71. – С. 13–19.

17. Мичуда Л. З. Функціональні перетворювачі рекурентного типу на комутованих конденсаторах для систем енергообліку / Л. З. Мичуда, З. Р. Мичуда. // Вісник НУЛП – Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. – 2010. – №677. – С. 98–104.

18. Мичуда З. Р. Моделювання впливу струмів витікання в логарифмічних АЦП з накопиченням заряду з імпульсним від'ємним зворотним зв'язком / З. Р. Мичуда, Л. З. Мичуда, У. С. Антонів. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – №5 (98). – С. 164–166.

19. U. Antoniów, L. Myszczuda, Z. Myszczuda, A. Szczesniak. Logarytmiczne przetworniki analogowo-cyfrowe z nagromadzeniem ładunku i impulsowym sprzężeniem zwrotnym// PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R.89, NR 8/2013, str. 277–281. (**Scopus**)

20. Мичуда З. Р. Оцінювання динамічних властивостей логарифмічних АЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках / З. Р. Мичуда, Л. З. Мичуда, У. С. Антонів. // Вісник НУЛП – Автоматика, вимірювання та керування. – 2014. – №802. – С. 37–44.

21. Мичуда З. Р. Логарифмічні АЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках. Частина 1 / З. Р. Мичуда, Л. З. Мичуда, У. С. Антонів. // Вісник НУЛП – Автоматика, вимірювання та керування. – 2016. – №852. – С. 62–68.

22. Мичуда З. Р. Слідкуючий логарифмічний аналого-цифровий перетворювач / З. Р. Мичуда, Л. З. Мичуда, І. А. Костів. // Вісник НУЛП – Автоматика, вимірювання та керування. – 2016. – №852. – С. 77–82.

23. Мичуда З. Р. Логарифмічні АЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках. Частина 2 / З. Р. Мичуда, Л. З. Мичуда, У. С. Антонів. // Вісник НУЛП - Автоматика, вимірювання та керування. – 2017. – №880. – С. 9–17.

24. Мичуда З. Р. Інтегральні аналого-цифрові перетворювачі з логарифмічною характеристикою перетворення. Огляд / З. Р. Мичуда, Л. З. Мичуда, Г. С. Єлісеєва. // Вісник НУЛП – Автоматика, вимірювання та керування. – 2017. – №880. – С. 31–39.

25. Мичуда Л. З. Підвищення точності вимірювання віддалі до об'єкта (Accuracy Increase of Distance Measurement to the Object) / Л. З. Мичуда, В. Д. Погребенник. // Збірник наукових праць «Комп'ютерні технології друкарства»(Computer Technologies of Printing ISSN 2411-9210). – 2017. – №2(38). – С. 112–127. (**Index Copernicus**)

26. Мичуда Л. З. Вдосконалений рекурентний метод аналого-цифрового функціонального перетворення для підвищення точності та швидкодії (Improved Recurrent Method of Analog to Digital Functional Conversion for

Increase of Speed and Accuracy) / Л. З. Мичуда. // Збірник наукових праць «Комп'ютерні технології друкарства» (Computer Technologies of Printing ISSN 2411-9210). – 2018. – №1. – С. 73 – 92. (Index Copernicus)

27. Lesya Mychuda. Development of Algorithms for Improving the Accuracy and Performance Speed of a Functional Analog-to-Digital Converter // Східноєвропейський журнал передових технологій (Eastern-European Journal of Enterprise Technologies), ISSN 1729-3774 – 2018. – №3/9 (93). pp.58–69. – DOI:10.15587/1729-4061.2018.132479 . (Scopus, Index Copernicus)

### **ПРАЦІ, ЯКІ ЗАСВІДЧУЮТЬ АПРОБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ**

28. Мичуда Л.З., Мичуда З.Р. Вимірювальний перетворювач ємності на комутованих конденсаторах. // Матеріали МНТК «Приладобудування – 2003», Вінниця–Кореїз, 2003, – с.26–29.

29. Мичуда З.Р., Католик Б.О., Мичуда Л.З. Логарифмічне аналого-цифрове перетворення зі зміною основи логарифму // Матеріали МНТК «Приладобудування – 2004», Вінниця–Ялта, 2004, – с.63–67.

30. Мичуда З.Р., Ільканич К.І., Мичуда Л.З. Логарифмічне аналого-цифрове перетворення за рекурентним методом // Матеріали МНТК «Приладобудування – 2004», Вінниця–Ялта, 2004, – с.68–71.

31. Влах Г.І., Мичуда З.Р., Мичуда Л.З. Блок аналого-цифрового перетворення для лічильників електроенергії підвищеної точності // Сборник трудов международной НТК «Наука и предпринимательство», Ялта, 2005, – с. 64–68.

32. Влах Г.І., Мичуда З.Р., Мичуда Л.З. Підвищення швидкодії прецизійних перетворювачів напруга–частота. // Технічні вісті, №1<sub>(22)</sub>,2<sub>(23)</sub>. – Львів, 2006, – с.102.

33. Мичуда Л.З. Оцінка завадостійкості аналогових функціональних перетворювачів на комутованих конденсаторах// Матеріали XVIII МНТК з автоматичного управління «Автоматика-2011», Львів, 2011, – с.404–405.

34. Мичуда Л.З. Обчислення степеневих рядів за допомогою аналогових функціональних перетворювачів на комутованих конденсаторах// Матеріали XIII міжнародної НТК «Приборостроение – 2004», Вінниця–Кореїз, 2004. – с. 58–62.

35. Мичуда Л.З. Схемотехнічні рішення обчислювальних пристроїв на комутованих конденсаторах для обліку енергоносіїв // Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції «Вимірювання витрати та кількості газу», Івано-Франківськ, 2005. – с.56.

36. Мичуда Л.З. Аналогові та аналого-цифрові функціональні перетворювачі на комутованих конденсаторах для систем обліку енергоносіїв // Збірник праць 5-ї міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми економії енергії» – Львів – 2008. – с.341.

37. Мичуда З.Р., Мичуда Л.З., Антонів У.С. Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі з накопиченням заряду // Тези міжнародної НТК «Датчики, прилади та системи – 2008», Черкаси–Гурзуф, 2008, – с. 86–88.

38. Мичуда З.Р., Мичуда Л.З., Коструба О.Р. Паралельний логарифмічний аналого-цифровий перетворювач // Тези міжнародної НТК «Датчики, прилади та системи – 2008», Черкаси–Гурзуф, 2008, – с. 89–91.

39. Мичуда З.Р., Мичуда Л.З., Антонів У.С. Моделювання впливу струмів витікання в логарифмічних АЦП з накопиченням заряду з імпульсним від’ємним зворотним зв’язком // Тези міжнародної НТК «Контроль і управління в складних системах» (КУСС–2010), Вінниця, 2010, – с.151.

40. Мичуда Л.З. Оцінка впливу шумів на конденсаторні комірки аналогових функціональних перетворювачів на комутованих конденсаторах // Тези міжнародної наукової конференції «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-2010), Вінниця, 2010, – с. 149.

41. Мичуда Л.З. Функціональні перетворювачі на комутованих конденсаторах із зміною основи логарифму // Збірник тез доповідей Першої міжнародної наукової конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС – 2011), 18–20 жовтня 2011р., Вінниця: ВНТУ, 2011, – с.74.

42. Мичуда Л.З. Методи зміни основи логарифма для покращення метрологічних характеристик аналого-цифрових функціональних перетворювачів. // Збірник тез доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 15–16 травня 2018 р., Київ, Україна, – с.194–195.

43. Мичуда Л.З. Інтегральні аналого-цифрові перетворювачі з логарифмічною характеристикою перетворення. Огляд/ Мичуда Л. З., Мичуда З.Р., Єлісеєва Г. С. // Матеріали конференції Автоматика/Automatics – 2018/ XXV Міжнародна конференція з автоматичного управління, 18–19 вересня 2018 року, Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018, – с.120–122.

### **ПУБЛІКАЦІЇ, ЯКІ ДОДАТКОВО ВІДОБРАЖАЮТЬ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ**

44. Патент 39126 Україна. Аналоговий помножувач/ Мичуда З.Р., Дудикевич В.Б., Влах Г.І., Мичуда Л.З. 2001, Бюл.№5.

45. Патент 57054 Україна. Аналоговий багатофункціональний перетворювач/ Мичуда З.Р., Дудикевич В.Б., Мичуда Л.З., 2003, Бюл. №6.

46. Патент 89229 Україна. Аналоговий багатофункціональний перетворювач/ Мичуда З.Р., Мичуда Л.З., 2010, Бюл. №21.

47. Патент 113138 Україна. Логарифмічний аналого-цифровий перетворювач/ Мичуда Л.З., 2016, Бюл. №23.

48. Патент 114064 Україна. Спосіб функціонального аналого-цифрового перетворення/ Мичуда Л.З., 2017, Бюл. №7.

49. Patent 227862 Polska. Logarytmiczny przetwornik analogowo-cyfrowy/ Myszuda Z., Myszuda Ł., Antoniów U., Szczesniak A., 2018, WUP 01/18.

50. Заявка на патент на винахід № а201805976 Україна. Функціональний аналого-цифровий перетворювач / Мичуда Л.З., Заявл 29.05.2018, Опубл. 25.09.2018, Бюл «Промислова Власність» №18, 2018.

51. Патент 116938 Україна. Спосіб логарифмічного аналого-цифрового перетворення / Мичуда Л.З., 2018, Бюл №10/2018.

52. Заявка на патент на винахід № а201806835 Україна. Спосіб логарифмічного аналого-цифрового перетворення/ Мичуда Л.З., Заявл 18.06.2018, Опубл. 25.10.2018, Бюл «Промислова Власність» №20, 2018.

### АНОТАЦІЯ

**Мичуда Л.З. Теорія та практика аналого-цифрових функціональних перетворювачів на комутованих конденсаторах.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп’ютерні системи та компоненти. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2019.

У дисертації започатковано нові та розвинуто відомі теоретичні та практичні основи функціонального перетворення аналогових сигналів, зокрема, розроблено методологічні засади побудови, створено нові методи, математичні моделі, алгоритми та засоби аналого-цифрового функціонального перетворення на комутованих конденсаторах, що значно переважають аналоги розширеними функціональними можливостями, підвищеною точністю та швидкодією. Методологічні засади побудови АЦФП на комутованих конденсаторах поєднують структурні (зміни основи логарифмування і співвідношення ємностей) і алгоритмічні (вибору числа піддіапазонів перетворення, кількості та величини кроків на кожному з них) принципи підвищення точності та швидкодії. Наведено результати експериментальних досліджень розроблених нових АЦФП і показано їх переваги над аналогами за функціональними можливостями та характеристиками.

**Ключові слова:** аналого-цифрове функціональне перетворення, комутовані конденсатори, принципи, методи, алгоритми, засоби, моделювання.

### АННОТАЦИЯ

**Мычуда Л.З. Теория и практика аналого-цифровых функциональных преобразователей на коммутируемых конденсаторах.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. –



Национальный университет «Львівська політехніка» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2019.

В диссертации основаны новые и развиты известные теоретические и практические основы функционального преобразования аналоговых сигналов, в частности, разработаны методологические принципы построения, созданы новые методы, математические модели, алгоритмы и средства аналого-цифрового преобразования на коммутируемых конденсаторах, которые значительно преобладают аналоги расширенными функциональными возможностями, повышенной точностью и быстродействием.

Методологические принципы построения АЦФП на коммутируемых конденсаторах сочетают структурные (изменения основы логарифмирования и соотношения емкостей) и алгоритмические (выбора числа поддиапазонов преобразования, количества и величины шагов на каждом из них) принципы повышения точности и быстродействия. На основе этих принципов впервые:

реализованы новые методы аналого-цифрового функционального преобразования: метод многофункционального аналого-цифрового преобразования с параллельным опросом логарифматоров; метод логарифмического аналого-цифрового преобразования разницы двух входных напряжений; метод логарифмического аналого-цифрового функционального преобразования со сравнением уровней компенсационных напряжений соседних поддиапазонов;

развито: метод рекуррентного аналого-цифрового функционального преобразования с многократным обращением к эталону старшего разряда; метод логарифмического аналого-цифрового преобразования с импульсной обратной связью с созданием режима короткого замыкания на выходе преобразователя напряжение-ток;

предложен новый принцип действия интерполирующих логарифмических аналого-цифровых преобразователей с сочетанием перераспределения и накопления заряда.

На основе разработанных методов аналого-цифрового функционального преобразования созданы новые алгоритмы и структуры АЦФП и реализованы действующие макеты АЦФП, экспериментальные исследования которых показали преимущество их в точности, быстродействии и функциональных возможностях над известными аналогами, в частности, дают возможность получить степенные функции и корни с показателем 10 и больше, логарифм разницы двух напряжений, перемножать и делить до 10 и больше входных сигналов, обеспечить точность на 2 – 4 разряда выше разрядности АЦФП.

**Ключевые слова:** аналого-цифровое функциональное преобразование, коммутируемые конденсаторы, принципы, методы, алгоритмы, средства.

**ABSTRACT**

**Mychuda L.Z. Theory and practice of analog-to-digital functional converters on switched capacitors.** – On the rights of the Manuscript.

Thesis for a Sc.D. (Doctor of Technical Sciences) degree by speciality 05.13.05 – Computer Systems and Components. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The thesis created new, and also received the further development of the well-known theoretical and practical bases of the functional conversion of analog signals, in particular, methodological principles of construction have been developed, new methods, mathematical models, algorithms and means of analog-to-digital functional conversion (ADFC) based on switched capacitors have been created, that considerably prevail analogues on advanced functionality, increased accuracy and speed. Methodological principles of construction of ADFC on switched capacitors combine structural (changes of basis of taking the logarithm and ratio of capacities of capacitors) and algorithmic (the choice of number of subranges of conversion, amount and size of steps on each of them) principles of increase of accuracy and speed. Results of experimental researches of worked out new ADFC are brought and shown their advantages above analogues in functional possibilities and characteristics.

**Keywords:** analog-to-digital functional conversion, switched capacitors, principles, methods, devices, modelling, analysis.