

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**МУРАЩЕНКО ОЛЕКСАНДР ГЕННАДІЙОВИЧ**

УДК 681.325:004.3

**МЕТОД ТА ЗАСОБИ ГЕНЕРУВАННЯ ПІЛКОПОБІДНИХ СИГНАЛІВ  
ПІДВИЩЕНОЇ ЛІНІЙНОСТІ НА БАЗІ ЦАП ІЗ НИЗЬКОГЛІТЧЕВИМ  
КОДУВАННЯМ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2020

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник        доктор технічних наук, професор,  
  заслужений працівник освіти України  
**Азаров Олексій Дмитрович,**  
Вінницький національний технічний університет,  
декан факультету інформаційних технологій та комп'ютерної  
інженерії.

Офіційні опоненти:        доктор технічних наук, доцент  
**Мельничук Степан Іванович,**  
Івано-Франківський національний технічний університет  
нафти і газу,  
завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж;

доктор технічних наук, доцент  
**Мичуда Леся Зиновіївна,**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
доцент кафедри автоматизації теплових і хімічних процесів.

Захист відбудеться 02 квітня 2020 р. о 10:00 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.

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

Автореферат розісланий 28 лютого 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С. М. Захарченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Генератори сигналів, а також пристрої, на яких побудовано вказані генератори, зокрема цифроаналогові перетворювачі (ЦАП) та лічильники імпульсів, широко застосовуються в системах опрацювання сигналів, телекомунікації, бездротового зв'язку, різноманітних системах керування і тому подібне. Варто зазначити, що сфера застосування цифроаналогових перетворювачів не обмежується галуззю перетворення «код-аналог». Використовуючи ЦАП можна визначати добутки двох або більше сигналів, будувати ділянки функцій, аналогові ланки, керовані від мікроконтролерів, такі як атенюатори та інтегратори. Важливою галуззю застосування ЦАП є також генератори сигналів, у тому числі сигналів довільної форми, зокрема систем прямого цифрового синтезу (DDS). Причому саме ЦАП у кінцевому випадку визначає точність формування вихідного аналогового сигналу. Слід також відзначити, що переважна більшість наукових досліджень у цьому плані присвячена опису принципів синтезу аналогового сигналу по дискретних відліках та реалізації цифрової частини систем. Водночас аналіз впливу динамічних характеристик ЦАП на похибку формування аналогового сигналу розглядається недостатньо. Це безумовно призводить до спрощеного сприйняття можливостей пристроїв DDS і необґрунтованого завищення досяжних параметрів вихідного сигналу.

Окремим негативним чинником при цьому є так звані глітчів – короточасні паразитні викиди вихідного сигналу  $A_{\text{вих}}$ , що виникають під час зміни вхідного коду ЦАП. Вплив цих викидів на форму сигналу істотно посилюється за умови збільшення частоти зміни коду  $k_{\text{вх}}$ . Для вибору підходів, що використовуються для зменшення глітчів, надзвичайно важливо розуміти причини та чинники, що викликають виникнення глітчів у ЦАП.

Дослідженню та моделюванню глітчів у ЦАП присвячено деякі сучасні оригінальні розробки, проте в них є суттєві недоліки, які не дають можливості оцінити поведінку глітчів при збільшенні числа розрядів, що перемикаються та при використанні ЦАП як частини складніших систем генерування та опрацювання сигналів. Проте, саме у цих випадках вплив глітчів суттєво зростає, що, в свою чергу, впливає на точність, швидкодію та інші характеристики ЦАП, зокрема, та пристроїв і систем, де вони використовуються, в цілому. Іншим недоліком існуючих досліджень є те, що вони аналізують лише одну причину виникнення глітчів, ігноруючи ряд інших, що призводить до значних обмежень отриманих результатів.

Слід зазначити, що для зменшення глітчів дієвим є застосування в ЦАП вагової надлишковості. Цей метод не залежить від конкретних параметрів обладнання та впливу навколишнього середовища, а також не вимагає використання значної кількості додаткового обладнання. Дослідженню цього підходу присвячено деякі сучасні оригінальні розробки науковців у різних країнах далекого зарубіжжя, зокрема Японії, однак в них є значні недоліки, для подолання яких необхідно введення у схему додаткового обладнання, що у свою чергу є нетривіальною задачею і може призвести до значних ускладнень, що пов'язані з точністю, швидкодією і т. ін..

Дослідження щодо покращення характеристик ЦАП на основі застосування вагової надлишковості виконуються в Вінницькому національному технічному університеті з 70-х років минулого століття в науковій школі професора О.Д. Азарова. Так, зокрема, починаючи з 2000-х років здійснюються активні дослідження щодо застосування вагової надлишковості з метою зменшення глітчів у ЦАП.

Варто відзначити, що задача дослідження та зменшення глітчів під час генерування сигналів підвищеної лінійності на теперішній час остаточно не вирішена, а кількість публікацій у науково-технічній літературі, присвячених дослідженню глітчів та засобів їх зменшення під час цифроаналогового перетворення, є незначною. У зв'язку з цим питання розробки методу та засобів генерування пилкоподібних сигналів підвищеної лінійності на базі ЦАП із низькоглітчевим кодуванням є актуальною задачею, що і стало темою цієї дисертації.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження виконувалися при реалізації НДР за темою 58-Д-393, «Спеціалізовані аналого-цифрові системи аудіолокації та ідентифікації об'єктів на місцевості» (номер державної реєстрації 0115U001119).

**Мета і завдання дослідження.** Метою досліджень є покращення лінійності цифрових генераторів пилкоподібних сигналів, що відрізняються від існуючих застосуванням низькоглітчевого кодування на основі ЦАП із ваговою надлишковістю. У рамках вибраного напрямку здійснено постановку таких задач досліджень:

1. Запропонувати новий метод генерування пилкоподібних сигналів підвищеної лінійності шляхом застосування низькоглітчевого кодування на основі ЦАП із ваговою надлишковістю.

2. Скласти математичну модель глітчів у ЦАП із ваговою надлишковістю та провести її аналіз. Визначити параметри та фактори, що впливають на амплітуду та тривалість глітча в ЦАП.

3. Запропонувати та проаналізувати методи швидкої лічби в модифікованій системі числення Фібоначчі та навести її формальний опис. Розглянути підходи щодо структурної організації лічильників для вказаних систем числення Фібоначчі як складових частин низькоглітчевих генераторів пилкоподібних сигналів. Оцінити апаратні витрати та швидкодію вказаних лічильників.

4. Проаналізувати ефективність застосування вагової надлишковості для зменшення рівня глітчів у ЦАП як складових частин низькоглітчевих генераторів пилкоподібних сигналів та визначити оптимальні параметри систем числення для таких ЦАП.

5. Навести рекомендації щодо проектування аналогових та цифрових вузлів низькоглітчевих генераторів пилкоподібних сигналів підвищеної лінійності, зокрема перетворювача струм напруга на базі швидкодіючого двотактного балансного підсилювача та низькоглітчевих цифроаналогових перетворювачів із ваговою надлишковістю. Систематизувати їх статичні та динамічні характеристики.

6. Виконати програмне моделювання характеристик аналогових та цифрових вузлів вказаних генераторів як за допомогою існуючих інтегрованих пакетів прикладних програм, так і розроблених спеціальних програмних засобів.

**Об'єкт дослідження:** процес генерування пилкоподібних сигналів підвищеної лінійності шляхом застосування низькоглітчевого кодування на основі ЦАП із ваговою надлишковістю.

**Предмет дослідження:** глітчi, що виникають у генераторах пилкоподібних сигналів із низькоглітчевим кодуванням, а також пристрої, на яких побудовано вказані генератори, зокрема ЦАП і швидкодіючі лічильники імпульсів на основі систем числення з ваговою надлишковістю.

**Методи дослідження.** У процесі досліджень використовувались: теорія цифроаналогового перетворення з ваговою надлишковістю для аналізу глітчів в ЦАП; теорія цифрових автоматів для синтезу схем швидкодіючих лічильників в МФ-системі числення; теорія математичного аналізу, методи апроксимування та інтерполювання функцій та теорія чисельних методів для аналізу та створення математичної моделі глітчів в цифроаналогових перетворювачах та генераторах сигналів; алгебра логіки та теорія алгоритмів для створення нового методу зменшення глітчів у генераторах пилкоподібних сигналів; комп'ютерне моделювання для аналізу параметрів ЦАП з ваговою надлишковістю та двотактних підсилювачів постійного струму (ДППС), а також для перевірки отриманих теоретичних положень; теорія об'єктно-орієнтованого та системного програмування для розробки програмного забезпечення для розрахунку та дослідження ефективності застосування вагової надлишковості з метою зменшення глітчів та для моделювання роботи швидкодіючого фібоначчієвого лічильника..

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що:

1. Вперше запропоновано метод зменшення глітчів у генераторах пилкоподібних сигналів, особливість якого полягає в застосуванні низькоглітчевого кодування на базі ЦАП із ваговою надлишковістю, що дозволило підвищити лінійність сигналу, що генерується.

2. Вперше розроблено математичну модель глітчів, що виникають у ЦАП із ваговою надлишковістю, особливістю якої є можливість її застосування для довільного числа розрядів, що дозволило оцінити час дії та амплітуду глітчів під час перемикання розрядів ЦАП.

3. Вперше запропоновано метод побудови швидкодіючих лічильників, особливість якого полягає у використанні для їх синтезу модифікованої системи числення Фібоначчі (МФ-системи числення), що дозволяє розширити діапазон лічби та зменшити кількість обладнання порівняно з відомою системою числення Фібоначчі, а також зменшити кількість перенесень (максимум до 5) порівняно із класичною двійковою системою числення.

4. Вперше запропоновано методіку оцінювання ефективності застосування вагової надлишковості, критерієм якої є зменшення рівня глітчів у ЦАП та запропоновано оптимальні параметри систем числення, на основі яких побудовано ЦАП, що дає можливість досягти максимального результату при мінімальному подовженні розрядної сітки.

**Практичне значення отриманих результатів:**

1. Розроблено загальні схеми структурної організації фібоначчієвих лічильників в МФ-системі числення трьох видів: лічильник, що додає, лічильник, що віднімає, а також реверсивний лічильник та схеми структурної організації їх

окремих розрядів. Проведено аналіз наведених структурних рішень і їх динамічних характеристик. Виконана оцінка апаратних витрат і швидкодії розроблених лічильників. Вказаний аналіз довів, що описані фібоначчєві лічильники поєднують ефективну апаратну реалізацію з високою швидкодїєю.

2. Запропоновано структурну організацію низькоглітчевого ЦАП на основі систем числення із ваговою надлишковістю, а саме з дробовими вагами розрядів, зокрема р-кодів золотої пропорції, та цілочисловими вагами розрядів, зокрема р-кодів Фібоначчі.

3. Розроблено структурні і принципіві схеми двотактних підсилювачів постійного струму (ДППС) з низькоомним та високоомним входами. Доведено, що використання ДППС з низькоомним входом дозволить покращити динамічні характеристики перетворювача код–струм з підвищеною паразитною вхідною ємністю ЦАП порівняно з високоомним.

4. Запропоновано структурні схеми генераторів пилкоподібних сигналів підвищеної лінійності на основі фібоначчєвого цифроаналогового перетворювача та з використанням швидкодіючих фібоначчєвих лічильників. Надано опис структурної організації таких генераторів та функціональних схем їх лічильників, а також детально розглянута та проаналізована їх робота. Обґрунтовано, що використання запропонованих генераторів у порівнянні з відповідними рішеннями на основі двійкової системи числення дозволяє підвищити швидкодію та зменшити рівень глітчів у процесі генерування пилкоподібних сигналів.

5. Розроблено програмні засоби для моделювання роботи швидкодіючих фібоначчєвих лічильників. Проведене комп'ютерне моделювання підтвердило розраховані аналітичним шляхом характеристики вказаного лічильника.

Основні результати досліджень впроваджено в Інституті електроніки та зв'язку Української академії наук для побудови інформаційно-вимірювальних та радіотехнічних пристроїв з підвищеною завадостійкістю і швидкодією, а також у навчальний процес Вінницького національного технічного університету за спеціальністю 123 – «Комп'ютерна схемотехніка», «Основи теорії лінійних інтегральних схем», «Аналогові та аналого-цифрові пристрої», «Перетворювачі форми інформації з ваговою надлишковістю».

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати, викладені у дисертаційній роботі, отримані автором особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати: розробка математичної моделі та методу зменшення глітчів у ЦАП із ваговою надлишковістю [1]-[2], [20]-[21]; розробка методу побудови швидкодіючих фібоначчєвих лічильників [3]; ідея модифікації системи числення Фібоначчі та способу лічби в ній [4]-[5], [8]; розробка зв'язків між лічильними тригерами, входом тактових імпульсів та інформаційними виходами лічильників [6], [14], [17]-[18]; дослідження залежності похибок перетворення у ЦАП від рівня вагової надлишковості [7], [9]-[10]; запропоновано схеми двотактних підсилювачів постійного струму з низькоомним і високоомним входами [11]-[12]; розробка зв'язків між цифроаналоговим перетворювачем в кодї Фібоначчі, генератором тактових імпульсів та лічильником в модифікованій фібоначчєвій системі числення [15]-[16]; дослідження залежності глітчів у ЦАП від різних чинників, зокрема, від кількості розрядів, що перемикаються, асинхронності

вмикання та вимикання розрядів ЦАП, недосконалості елементної бази та конкретних параметрів схеми [15]-[16], [22]-[23]; структури низькоглітчевих перетворювачів форми сигналу з ваговою надлишковістю [19]; розробка та реалізація алгоритму комп'ютерної програми [20]-[21].

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися та обговорювалися на міжнародних конференціях: Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія» (Вінниця, 2010, 2014), Міжнародної науково-практичної конференції «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації» (Вінниця, 2011, 2017).

**Публікації.** Основні результати досліджень опубліковано у 23 наукових працях, у тому числі 10 статей у фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз (з них 2 у базі Scopus і IEEE Xplore), 3 у матеріалах конференцій, 8 патентах України на корисну модель, 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить 196 сторінок, основний зміст викладено на 143 сторінках друкованого тексту. Робота містить 62 рисунки, 21 таблицю, список використаних джерел із 147 найменувань та 7 додатків.

## 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 отриманих результатів, надано інформацію про їх впровадження, апробацію, публікації та структуру дисертації.

**У першому** розділі наведено існуючі математичні моделі глітчів, що виникають під час цифроаналогового перетворення та показано їх недосконалість.

Глітч – це короткочасні паразитні викиди вихідного сигналу  $A_{\text{вих}}$ , що виникають під час зміни вхідного коду ЦАП. Вплив цих викидів на форму сигналу істотно посилюється за умови збільшення частоти змінення коду  $k_{\text{вх}}$ . Схематичне зображення глітча наведено на рис. 1.

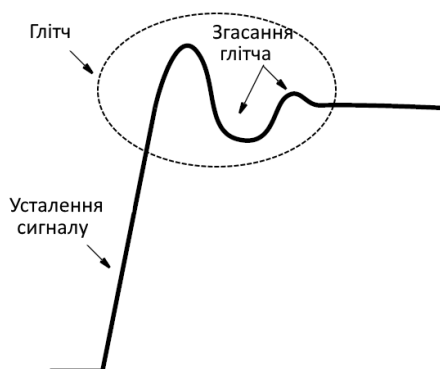


Рисунок 1 – Умовне зображення глітча під час усталення сигналу

Глітч можуть значно обмежити швидкодію ЦАП, що в свою чергу обмежує їх практичне використання при побудові реальних систем. Особливо критичним є виникнення глітчів у динамічних системах, наприклад в генераторах сигналів, де глітч можуть істотно спотворити форму вихідного сигналу.

В ідеальному випадку під час зміни кодової комбінації вихідний сигнал ЦАП повинен змінюватись монотонно від попереднього до нового значення. На практиці в результаті дії

різних факторів виникають глітчі, які можуть мати досить складну форму. Однак найважливішими параметрами глітча є амплітуда та час його згасання. Водночас для оцінювання параметрів ЦАП доцільно використати термін «енергія глітча» (glitch energy), яка математично визначається як інтеграл від потужності глітча по часу. Проте для характеристики реальних ЦАП у науковій літературі та технічній документації часто використовують термін «площі глітча» («glitch impulse area» або «glitch area»), що показана на рис. 2 і яка математично визначається як інтеграл від наруги (струму) глітча по часу та вимірюється у вольт-секундах ( $V \cdot s$ ), тобто:

$$G_{DAC} = \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt .$$

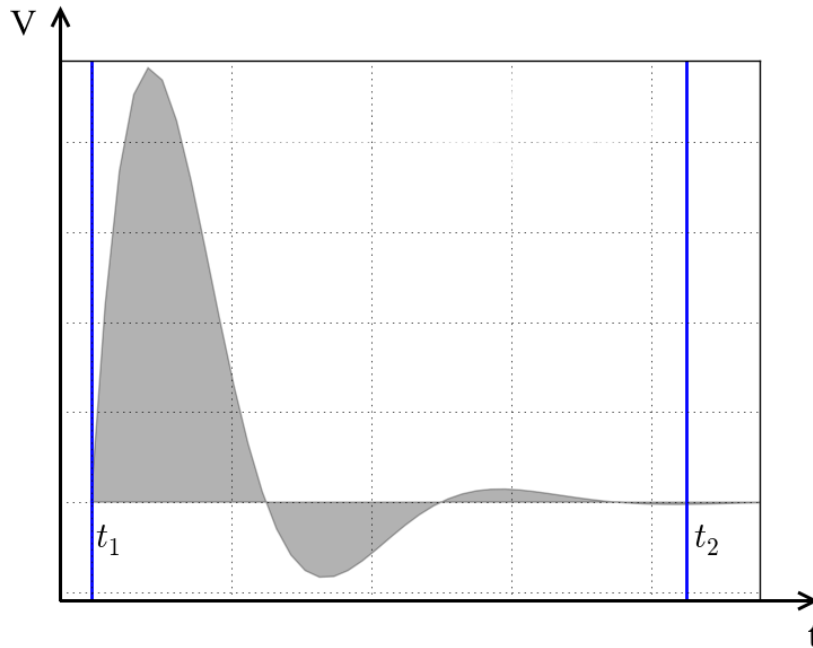


Рисунок 2 – Форма глітча, що використовується для визначення його площі

На практиці значення площі глітча неможливо оцінити точно, тому застосовуються різні види апроксимації. В найпростішому випадку форма глітча може бути спрощена до рівнобедренного трикутника, тоді площа глітча визначається таким чином:

$$G_{DAC} = \frac{A_{гл} \cdot \Delta t}{2} ,$$

де  $A_{гл}$  – амплітуда, а  $\Delta t$  – час згасання, тобто тривалість глітча.

Для точнішого розрахунку площі глітча при обчисленні інтегралу можливе використання чисельних методів, зокрема методу прямокутників, методу трапецій та методу Сімпсона. Однак, зазначені підходи неможливо застосувати на етапі проектування структурних та принципівих схем пристроїв, зокрема під час моделювання та вибору конкретних параметрів елементів та блоків ЦАП.

Проаналізовано недоліки існуючих математичних моделей глітчів, що виникають в ЦАП, а саме:

- не враховуються реальні параметри схеми, що значно обмежує випадки практичного застосування;



- моделі є необґрунтовано спрощеними, тому їх адекватність досить сумнівною.

- модель розроблена лише для перемикавання одного розряду, однак зі збільшенням кількості розрядів сумарний глітч значно ускладнюється, що суттєво обмежує вказаної моделі навіть для приблизної оцінки глітчів у ЦАП;

- аналізується лише одна причину виникнення глітчів та ігноруються ряд інших, що призводить до значних обмежень застосування результатів;

- не враховується розбалансування налаштувань схеми під час зміни умов експлуатації.

Розглянуто вплив глітчів на динамічні похибки в ЦАП. Показано, як реальна характеристика перетворення ЦАП може значно відрізнятись від ідеальної, зокрема за рахунок появи глітчів, що суттєво погіршує динамічні характеристики перетворювача і призводить до подальшого зменшення точності та швидкодії перетворення. Глітчі призводять до того, що в діаграмі вихідного сигналу ЦАП при переході від одного встановленого значення до другого виникають викиди різної амплітуди та направленості, що в свою чергу призводить до значного спотворення характеристики перетворення, як показано на рис. 3.

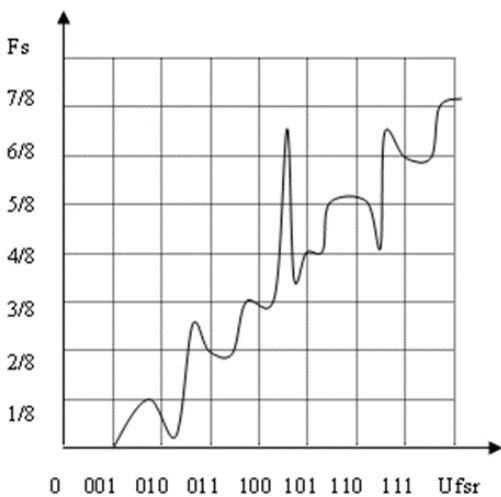


Рисунок 3 – Характеристика перетворення ЦАП з врахуванням глітчів

Наведено традиційні методи зменшення глітчів в ЦАП та їх недоліки. Найпростішим способом часткового зменшення глітчів є використання фільтру низьких частот (ФНЧ) на виході ЦАП. Хоча цей спосіб може не вимагати значного додаткового обладнання (в найпростішому варіанті може бути використаний звичайний RC-фільтр), проте він лише частково зменшує амплітуду глітчів, причому позитивний ефект є порівняно незначним. Іншим способом зменшення глітчів є застосування цифрового калібрування до

початку основної роботи ЦАП. Слід зазначити, що калібрування само по собі є нетривіальною задачею, в процесі якого можуть виникати досить суттєві похибки. Крім того це вимагає

додаткового обладнання і лише частково зменшує рівень глітчів. Цей підхід до того ж не є ефективним при змінних умовах навколишнього середовища, в яких потрібно було б постійно виконувати повторне калібрування.

Відомі і інші підходи, зокрема використання додаткового обладнання, такого як пристрій «вибірки-зберігання» або аналогової лінії затримки, що дозволяє частково позбутись глітчів, що виникають за рахунок затримки перемикавання сигналу з ЦАП на вихід пристрою. Однак це призводить до зменшення швидкодії ЦАП, збільшення похибки перетворення і вимагає додаткових апаратних затрат. Крім того сам пристрій «вибірки-зберігання» може вносити додаткові похибки. Альтернативним підходом зменшення глітчів на виході ЦАП є використання так званого динамічного калібрування, при якому в схему вводиться додатковий калібрувальний ЦАП, що компенсує похибки основного ЦАП. Проте, на практиці

схемотехнічна реалізація цього підходу є досить складною задачею і майже не застосовується в реальних ЦАП, що виробляються серійно.

Проаналізовано можливість застосування надлишкових позиційних систем числення з метою низькогітчевого кодування в ЦАП із ваговою надлишковістю та показано доцільність використання НПСЧ для побудови швидкодіючих лічильників, які є складовими ЦАП в режимі генерування неперервних аналогових сигналів.

Вибрано напрямок та поставлено задачі дослідження.

У другому розділі запропоновано математичну модель глітчів у цифроаналогових перетворювачах із ваговою надлишковістю, що дозволяє оцінити час дії та їх амплітуду під час перемикання розрядів ЦАП.

Важливою галуззю застосування ЦАП є генератори сигналів, у тому числі сигналів довільної форми, зокрема систем прямого цифрового синтезу (DDS) На рис. 4 наведено узагальнену структурну схему системи прямого цифрового синтезу аналогового сигналу ( $A_{\text{вих}}$ ) на базі ЦАП із ваговою надлишковістю. Причому саме ЦАП у кінцевому випадку визначає точність формування вихідного аналогового сигналу. У вказаній схемі з метою збільшення навантажувальної здатності доцільно до виходу  $\alpha$ -ЦАП підключити операційний підсилювач (ОП), що має низький вхідний опір. Це дозволяє додатково покращити характеристики системи прямого цифрового синтезу. Однак, поява глітчів в ЦАП істотно спотворює форму вихідного сигналу, особливо за умови збільшення частоти зміни коду  $k_{\text{вх}}$ .

Треба відзначити такі фундаментальні причини виникнення глітчів, а також відповідно складові їх моделей. Перша: виникнення глітча внаслідок асинхронності вмикання та вимикання розрядів ЦАП. Друга: глітч виникає внаслідок недосконалої елементної бази ЦАП, зокрема, наявності паразитних ємностей у ключових елементах, внаслідок чого керуючі сигнали проникають у коло перетворення і далі в навантаження.

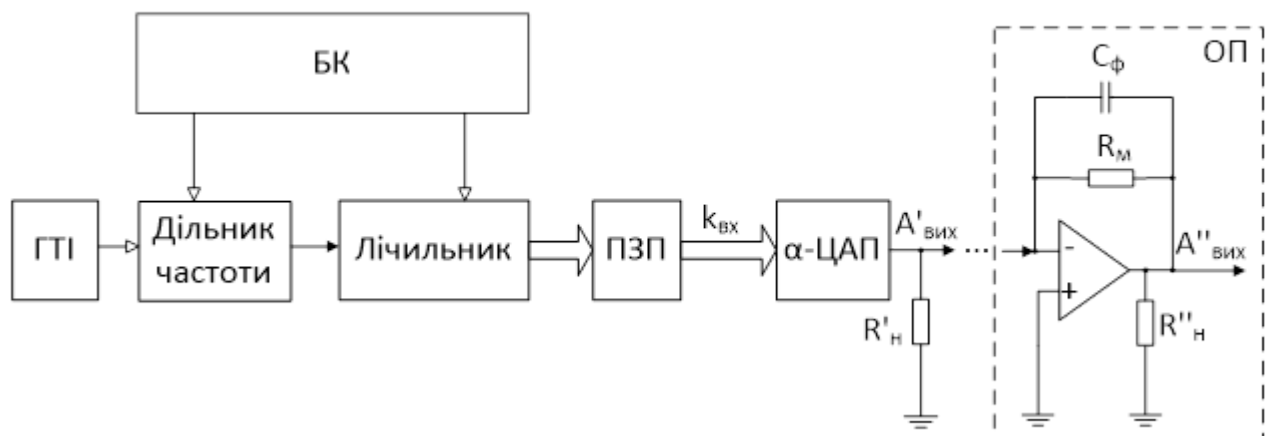


Рисунок 4 – Узагальнена структурна схема системи прямого цифрового синтезу на основі ЦАП із ваговою надлишковістю

Для дослідження механізму виникнення глітчів вибрано струмовий ЦАП на основі діодних ключів, як такий, що має максимальну швидкодію і точність. На рис. 5 зображено  $n$ -розрядний струмовий ЦАП, побудований на базі біполярних

транзисторів в діодному вмиканні.

Оскільки глітчі виникають саме в момент перемикання розрядів, то для побудови математичної моделі було використано відповідні схеми заміщення транзисторів в діодному вмиканні для ввімкненого та вимкненого розрядів. Складена математична модель дозволяє оцінити час дії та амплітуду глітчів, що виникають під час перемикання розрядів ЦАП залежно від різних чинників, а саме: параметрів ключових елементів, числа розрядів, амплітуди керуючих сигналів та опору навантаження.

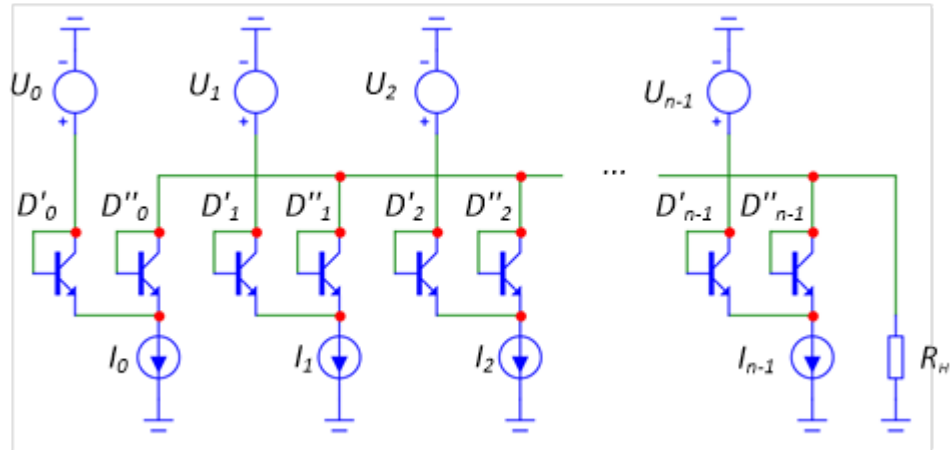


Рисунок 5 – n-розрядний несекціонований струмовий ЦАП

Так, для випадку 3-розрядного ЦАП струм на резисторі  $R_H$  можна виразити таким чином (функція наведена в операторній формі):

$$i_H(s) = \frac{\left(\frac{I_1}{s} + \frac{I_2}{s} + \frac{I_3}{s}\right) z_1(s) + \left(\frac{I_2}{s} + \frac{I_3}{s}\right) \frac{1}{sC} - \frac{E}{s}}{R_H + \frac{1}{sC} + z_1(s)}$$

У табл. 1 наведено розраховані значення амплітуди глітча та його тривалості для деяких значень вихідного опору  $R_H$ .

Таблиця 1 – Значення амплітуди та тривалості глітча в 3 розрядному ЦАП для деяких значень вихідного опору  $R_H$

$R_H$ , Ом	10	20	50	100	150	200	300	500	750	1000
$t_{уст}$ , нС	0,22	0,25	0,44	0,77	1,08	1,35	1,85	2,95	4,3	6,3
A, mA	-1	-1,25	-2	-3,3	-5	-7	-10	-20	-50	-100

Аналізуючи отримані дані можна зробити висновок, що зі збільшенням значення опору навантаження  $R_H$  час усталення вихідного сигналу  $I_{вих}$  збільшується, водночас значно зростає і амплітуда глітча, що критично впливає на швидкодію ЦАП. Графіки залежності часу усталення сигналу, тобто тривалості глітча, та

амплітуди глітча від опору навантаження ЦАП зображено на рис. 6а та 6б відповідно. Варто відзначити, що тривалість глітча залежить від опору навантаження майже лінійно, водночас залежність амплітуди глітча від  $R_n$  має логарифмічний характер.

На рис. 7 зображено глітчі в ЦАП в момент, коли старший розряд вимикається залежно від: а) вихідного опору  $R_n$ ; б) напруги  $U$  керування; в) паразитної ємності діодних ключів. Результати моделювання доводять, що зі збільшенням значення напруги керування ЦАП та паразитних ємностей збільшуються амплітуда глітчів і час їх згасання.

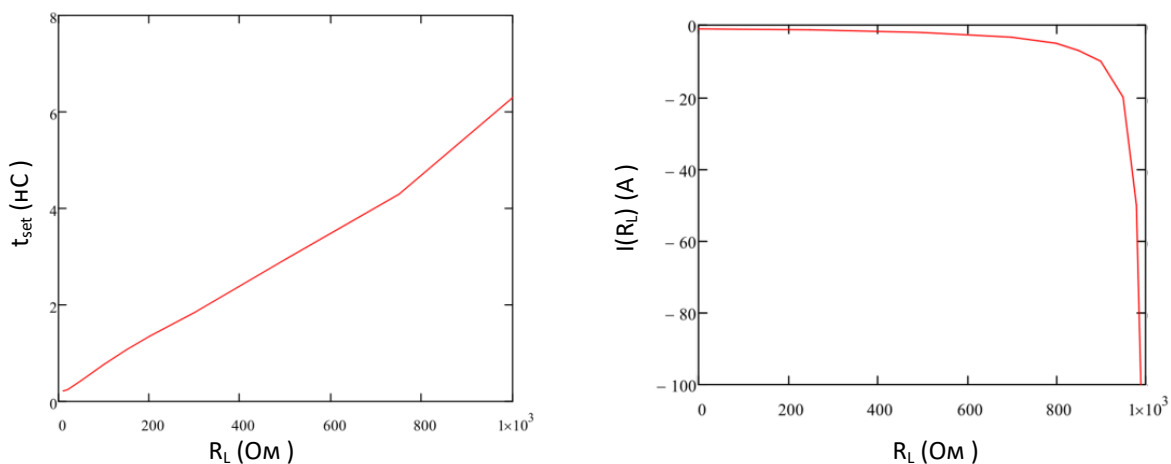


Рисунок 6 – Графік залежності параметрів глітча від навантаження на виході ЦАП: а) тривалість глітча; б) амплітуда глітча

Вперше запропоновано та досліджено зменшення глітчів у генераторах сигналів, побудованих на базі ЦАП із ваговою надлишковістю. Суть методу полягає у використанні в процесі цифроаналогового перетворення вагової надлишковості, що дозволяє зменшити перепади значень аналогової величини під час зміни вхідного коду  $k_{вх}$ . Доведено, що чим більшим є рівень цієї надлишковості, тим меншим є цей перепад у відносних одиницях.

Запропонований метод дозволяє зменшити другу складову глітча, а саме короткочасний викид вихідного сигналу, що виникає за рахунок асинхронності перемикавання розрядів. Вказана асинхронність, а конкретніше різниця в часі, може виникати внаслідок різних чинників, зокрема внаслідок затримки на цифрових ключах та як результат принципу асиметрії логіки вимірювання. Цей метод не залежить від конкретних параметрів обладнання та навколишнього середовища, а також не вимагає використання значної кількості додаткового обладнання.

Найгірший випадок виникає коли старший розряд уже увімкнувся, а молодші ще не встигли вимкнутись, тобто сигнал на виході ЦАП дорівнюватиме сумі цих розрядів, а значення глітча  $A_{гл}$  визначається як сума розрядів, що вимикаються.

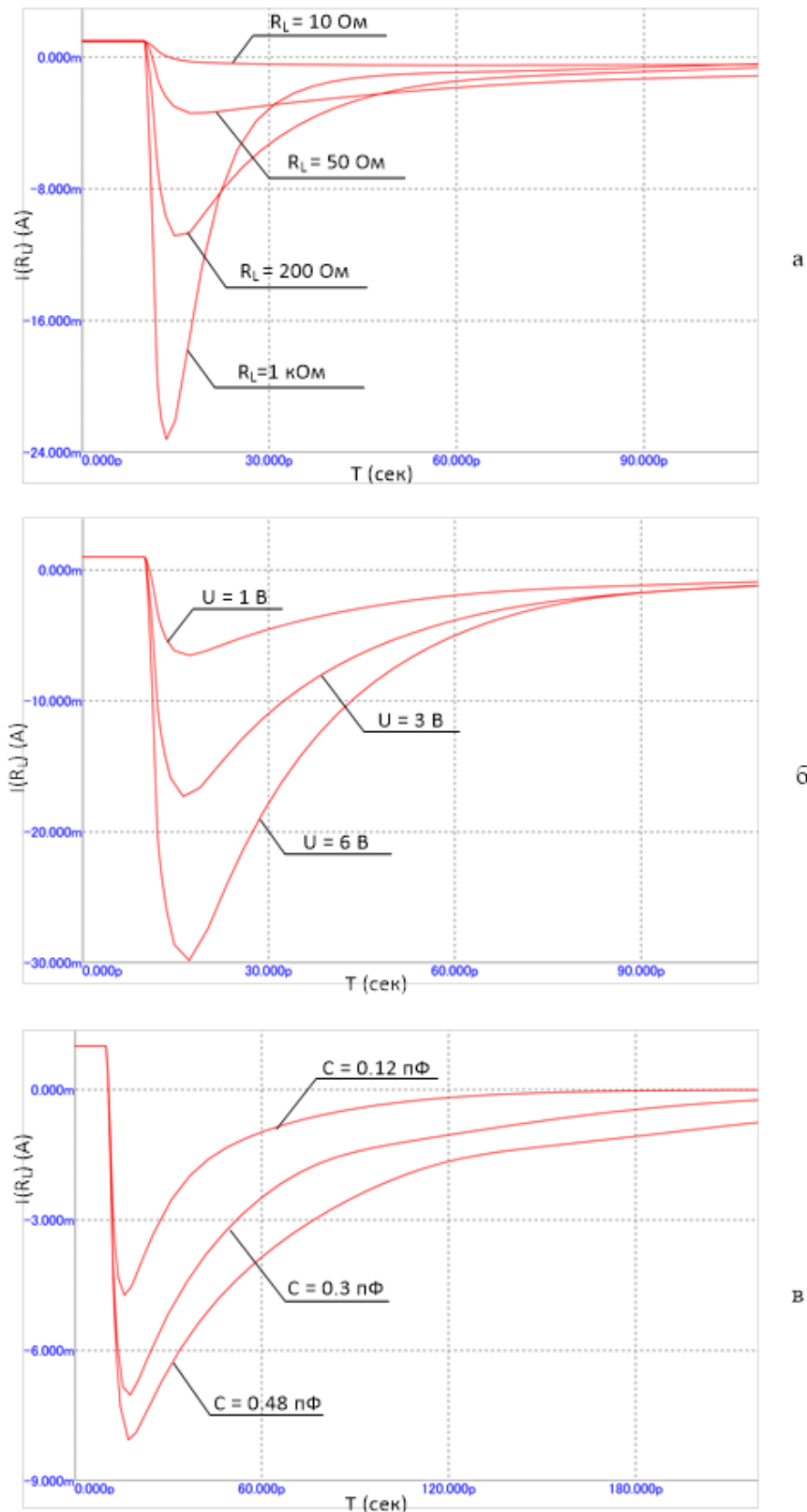


Рисунок 7 – Залежність часу згасання та амплітуди глітчів у ЦАП залежно від:  
 а) опору  $R_H$ ; б) напруги  $U$  керування; в) паразитної ємності діодних ключів

Слід зазначити, що для дослідження характеристик ЦАП важливішою величиною є не абсолютне, а відносне значення глітча  $\delta A_{\text{ГЛ}}$ , тобто його відношення до діапазону перетворення ЦАП:

$$\delta A_{\text{гл}} = \frac{A_{\text{гл}}}{D(n)}.$$

У випадку класичної двійкової системи максимальне відносне значення глітча складає:

$$\delta A_{\text{гл}} = \frac{Q_{n-1}}{D_2(n)} = \frac{2^{n-1}}{2^n} = \frac{1}{2},$$

що становить 50% діапазону перетворення.

Застосування надлишкових позиційних систем числення, зокрема систем числення на основі золоті р-пропорції та систем числення на основі р-чисел Фібоначчі, дає змогу значно зменшити кількість розрядів, що перемикаються одночасно (особливо в багаторозрядних ЦАП) порівняно з двійковою системою числення, а отже і зменшити амплітуду глітча,. Для досягнення додаткового ефекту доцільно застосувати так звані «згорнуто-розгорнуті» або модифіковані числа Фібоначчі (МФ-система числення) – модифікацію р-чисел Фібоначчі, запропоновану автором, яка дає змогу додатково зменшити загальну кількість розрядів на р порівняно з класичними р-числами Фібоначчі за рахунок того, що така система числення не має заборонених кодових комбінацій.

В табл. 2 наведено максимальне значення глітча в ЦАП для р-чисел Фібоначчі, що розраховано для еквіваленту 14 двійкових розрядів залежно від різних р, звідки видно, що чим більше значення р, тим менше значення глітча, що виникає внаслідок асинхронності перемикання розрядів.

Таблиця 2 – Відносне значення амплітуди глітча для систем числення на основі р-чисел Фібоначчі залежно від р

$p$	0	1	2	3	4	5	6
$\delta A_{\text{гл}}$	0,5	0,3827	0,3197	0,2753	0,2424	0,2248	0,2063

Запропоновано метод оцінювання ефективності застосування вагової надлишковості для зменшення рівня глітчів у ЦАП.

Слід зазначити, що використання вагової надлишковості призводить до подовження розрядної сітки порівняно з двійковою системою числення і ускладнює практичну реалізацію ЦАП, зокрема збільшує апаратні витрати. Тому при виборі надлишкової позиційної системи числення для побудови ЦАП потрібно одночасно враховувати не тільки зменшення амплітуди глітча, але й коефіцієнт подовження розрядної сітки ЦАП. Оцінити ефективність застосування НПСЧ для зменшення глітча можна за допомогою формули:

$$E = \frac{\delta A_{\text{гл}}(2) - \delta A_{\text{гл}}(\alpha)}{\gamma_n},$$

де  $\delta A_{\text{гл}}(2)$  – відносне значення глітча для двійкової системи числення,  $\delta A_{\text{гл}}(\alpha)$  – відносне значення глітча для надлишкової системи числення,  $\gamma_n$  – коефіцієнт подовження розрядної сітки.

Використовуючи метод оцінювання ефективності запропоновано оптимальні параметри систем числення, на основі яких побудовано ЦАП. Для розрахунку та дослідження ефективності вибраної системи числення було розроблено та описано спеціальне програмне забезпечення.

На рис. 8 наведено графіки залежності ефективності НПСЧ від параметрів системи числення.

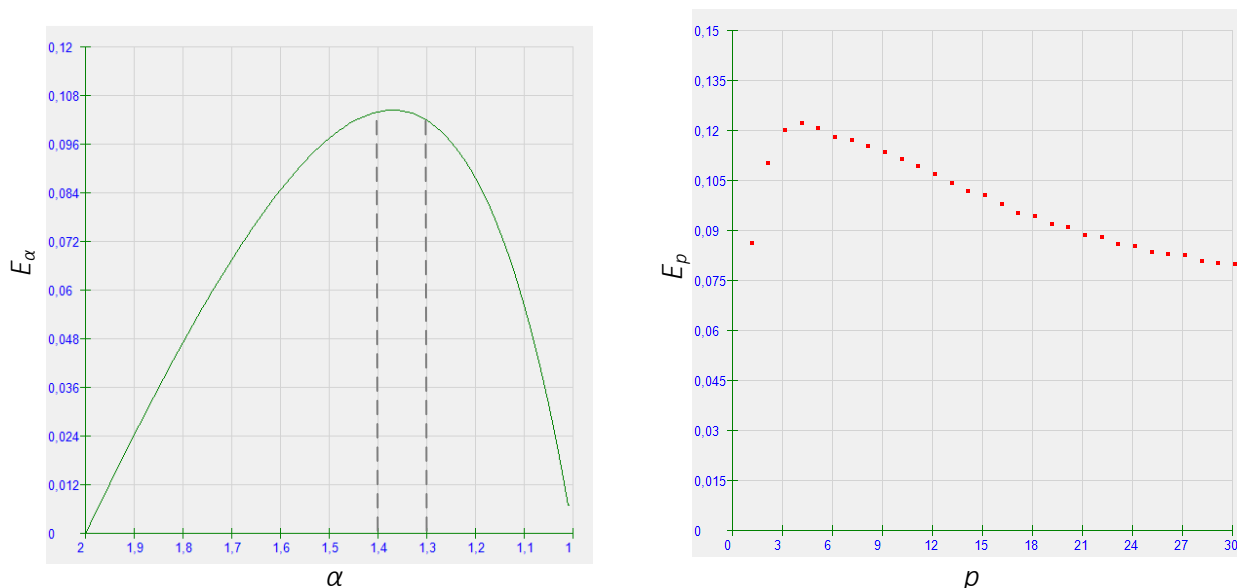


Рисунок 8 – Графік залежності ефективності НПСЧ: а) СЧ на основі золотої  $r$ -пропорції залежно від основи системи числення. б). МФ-системи числення залежно від значення  $p$

Доведено, для побудови реальних ЦАП із застосуванням НПСЧ з дробовими вагами розрядів оптимальним є використання коду золотої  $r$ -пропорції при  $r=3$  та МФ-системи числення при  $r=3$ .

**У третьому розділі** розглянуто формальний опис та методи лічби у модифікованій фібоначчівій системі.

Модифікована фібоначчівіа система числення (МФ-система числення) належить до класу надлишкових позиційних систем числення. Тому її можна описати за допомогою набору з двох множин: базису або множини ваг розрядів  $\Phi$  і алфавіту або множини цифр  $D$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi : \{ \phi_0 = 1, \phi_1 = 2, \forall_{i>1} (\phi_i = \phi_{i-1} + \phi_{i-2}) \} \\ D : \{ 0, 1 \} \end{array} \right\}$$

Базис являє собою множину ваг розрядів  $\phi_i$ , причому,  $\phi_0 = 1$ ,  $\phi_1 = 2$ , а для кожного  $i > 1$  виконується співвідношення  $\phi_i = \phi_{i-1} + \phi_{i-2}$ . Алфавіт являє собою

множину з двох цифр 0 і 1. Дана система числення подібна до відомої фібоначчієвої системи числення (Ф-системи числення) за виключенням ваги  $\phi_1$ . У відомій фібоначчієвій системі числення  $\phi_1 = 1$ , а в модифікованій  $\phi_1 = 2$ . Оскільки у відомій системі числення  $\phi_2 = 2$ , то коди, якими представляються числа в МФ-системі числення, фактично мають на один розряд менше ніж у Ф-системі числення, що приводить до зменшення інформаційної надлишковості.

Важливою характеристикою МФ-системи є наявність фібоначчієвого співвідношення (F співвідношення) між вагами розрядів, яке дозволяє виконувати у цій системі числення фібоначчієві перетворення з перенесенням у старші розряди (FL-перетворення) і з перенесенням у молодші розряди (FR-перетворення). Фібоначчієві перетворення є умовними арифметичними операціями, що виконуються над тріадами сусідніх розрядів і являють собою реалізацію перенесення і запозичення при додаванні і відніманні.

Іншою важливою особливістю МФ-системи числення є відсутність заборонених комбінацій, що дозволяє продовжити лічбу після досягнення значень, що є граничними для класичної Ф-системи, за рахунок чого додатково зменшується кількість розрядів, необхідна для представлення числа.

Доведено твердження про обмеженість довжини перенесення при лічбі з використанням F-перетворень. Ця властивість дозволяє зменшити довжину максимального перенесення, що може виникнути на кожному такті і таким чином підвищити її швидкодію за рахунок меншої кількості розрядів, що перемикаються одночасно (порівняно з класичною двійковою системою числення).

На основі теоретичних досліджень запропоновано швидкодіючі фібоначчієві лічильники трьох видів: лічильник, що додає, лічильник, що віднімає і реверсивний лічильник. Розроблено загальні схеми структурної організації кожного виду лічильника та схеми структурної організації їх окремих розрядів.

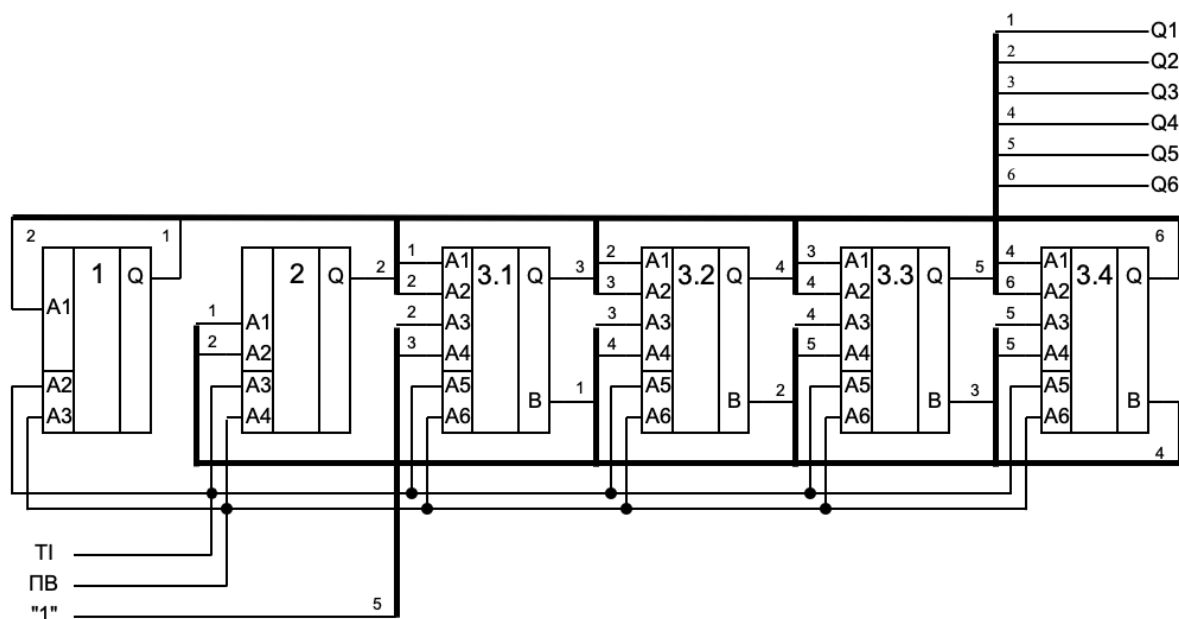


Рисунок 9 – Функціональна схема швидкодіючого фібоначчієвого лічильника, що додає



На рис. 9 зображено структурну організацію швидкодіючого шестирозрядного лічильника, що додає у МФ-системі числення, побудованого на основі лічильних тригерів. Лічильник складається з розрядних блоків 1, 2, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, що зображені на рис. 10.

Наведено приклади часових діаграм запропонованих лічильників, що пояснюють їх роботу та підтверджують працездатність. Аналіз наведених структурних рішень і часових діаграм дозволив автору зробити оцінку апаратних витрат і швидкодії розроблених ним лічильників. Вказаний аналіз довів, що описані у розділі 3 фібоначчєві лічильники поєднують ефективну апаратну реалізацію з високою швидкодією, що робить їх перспективними при використанні у різноманітних обчислювальних пристроях.

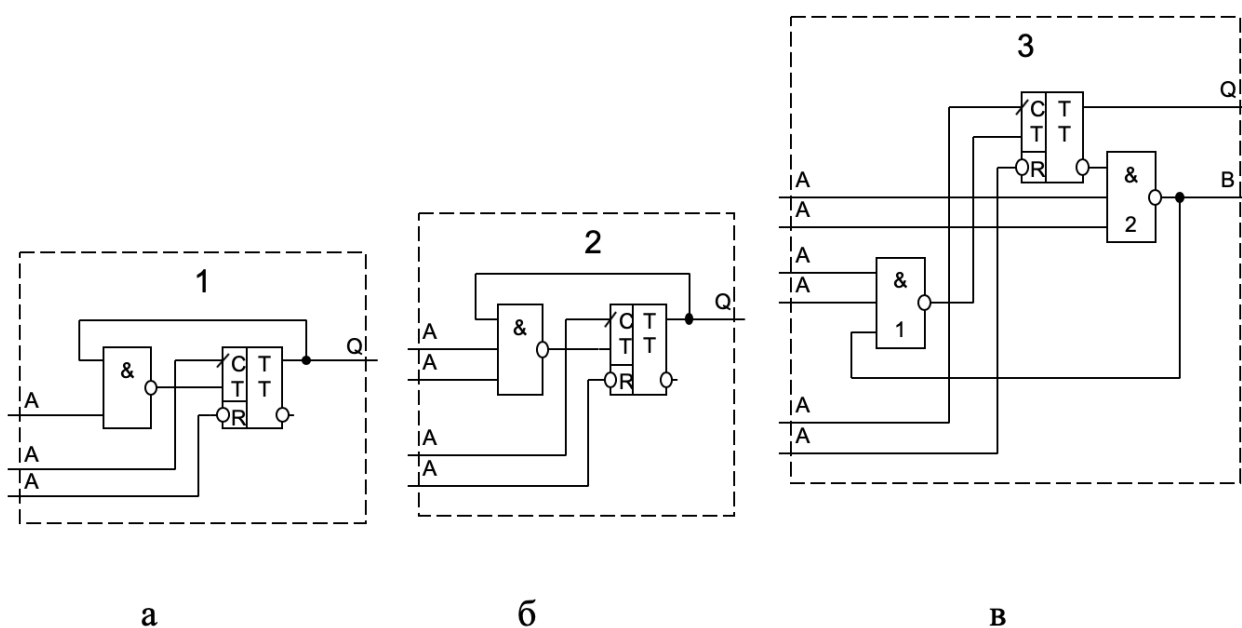


Рисунок 10 – Функціональні схеми розрядних блоків швидкодіючого фібоначчєвого лічильника, що додає: а). першого; б). другого; в). блоків, починаючи з третього

**У четвертому розділі** надано рекомендації щодо проектування засобів генерування пілкоподібних сигналів підвищеної лінійності із низькогітчевим кодуванням.

Розроблено структурні і принципові схеми двотактних підсилювачів постійного струму (ДППС) з параметричним коригуванням зсуву нуля та з вхідним каскадом на польових транзисторах.

Слід зазначити, що опір навантаження на виході ЦАП  $R_n$  визначається практичним застосуванням ЦАП. Так, у системі DDS, схему якої наведено на рис. 4, до виходу ЦАП доцільно підключити двотактний симетричний підсилювач струму. Найкращі показники для побудови високолінійних аналогових пристроїв мають ДППС із балансними зворотними зв'язками, які дозволяють суттєво зменшити рівень некоригованих похибок. Для зменшення похибки зсуву нуля доцільно застосувати метод структурно-функціональної організації ДППС із

автокоригуванням зсуву нуля, схему якого наведено на рис. 11.

Такий підсилювач має низький вхідний опір, за рахунок чого значно зменшується час згасання глітчів. Використання підсилювача також дає змогу мінімізувати напругу керування ЦАП, що у свою чергу призведе до додаткового зменшення амплітуди глітчів.

У рамках проведеного аналізу структурних та принципових схем ДППС доведено, що використання запропонованих високолінійних і швидкодіючих підсилювачів дозволить зменшити похибку зсуву нуля на 1-2 порядки і таким чином покращити статичні і динамічні характеристики ЦАП та багаторозрядних цифроаналогових систем у цілому.

Запропоновано структурні схеми генераторів пилоподібних та конусоподібних сигналів підвищеної лінійності із низькоглітчевим кодуванням на основі фібоначчєвого цифроаналогового перетворювача та з використанням швидкодіючих фібоначчєвих лічильників. Надано опис структурної організації таких генераторів та функціональних схем їх лічильників, а також детально розглянуто та проаналізовано їх роботу.

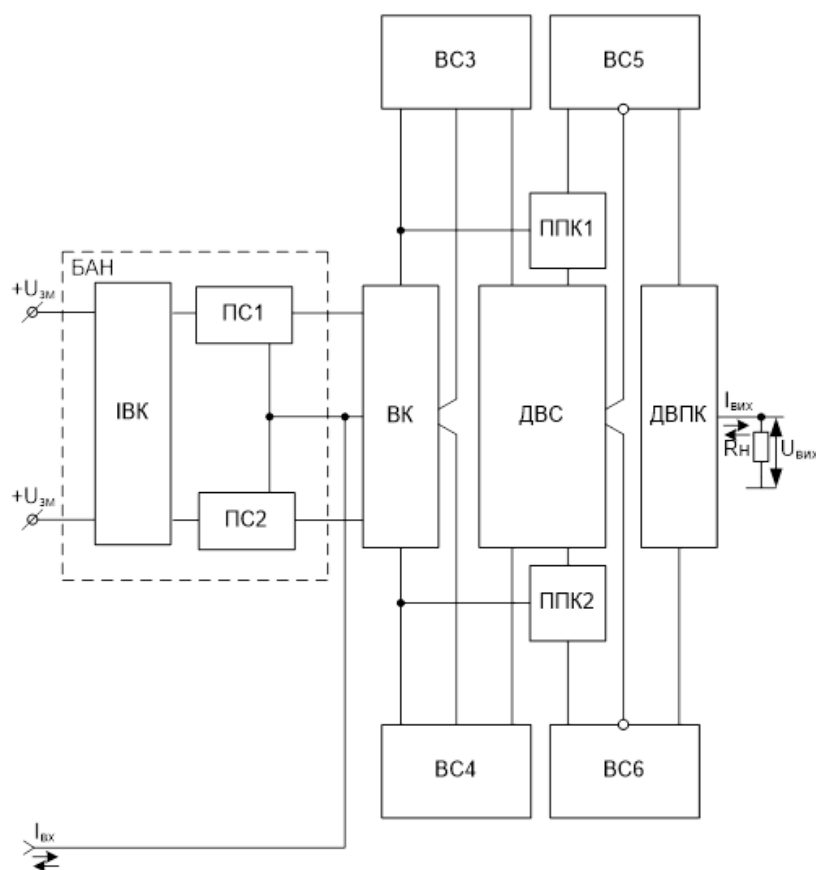


Рисунок 11 – Структурна схема ДППС із автокоригуванням зсуву нуля

У цифровій техніці широко використовуються лінійно-змінювані аналогові сигнали, до яких висуваються вимоги високої точності і швидкості їх генерування. Одним з найважливіших чинників, які впливають на точність генерованих сигналів, є лінійність характеристики перетворення ЦАП. Проте, для більш широкого застосування такі генератори повинні мати також і високу швидкодію.

Запропоновані генератори містить пристрій для підсумовування еталонних величин (СЕВ), генератор тактових імпульсів (ГТІ), цифро-аналоговий перетворювач в код Фібоначчі (ФЦАП) та лічильники у модифікованій фібоначчієвій системі числення (ФЛ для прямої лічби та ФРЛ та реверсивної). Наведено функціональні схеми та часові діаграми роботи вказаних лічильників, а також проаналізовано їх роботу та доведено доцільність використання.

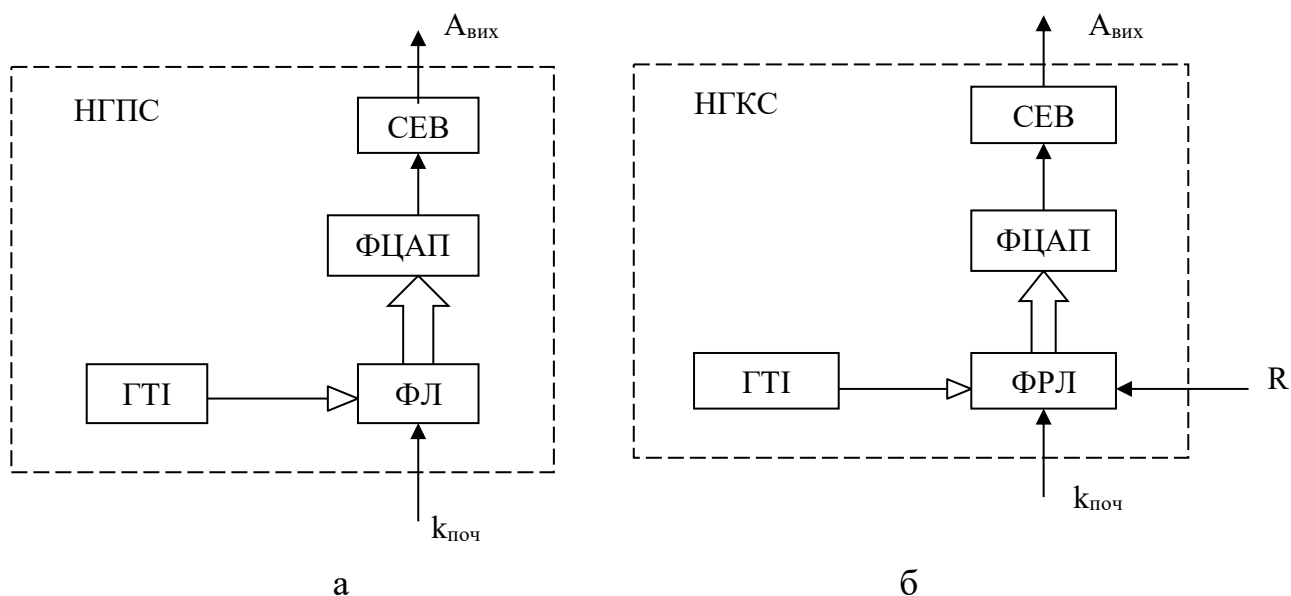


Рисунок 12 – Структурні схеми генераторів сигналів підвищеної лінійності із низькоглітчевим кодуванням: а). пилкоподібних сигналів; б). конусоподібних сигналів

Обґрунтовано, що використання запропонованих генераторів порівняно з відповідними рішеннями на основі двійкової системи числення дозволяє підвищити швидкодію та зменшити рівень глітчів у процесі генерування пилкоподібних та конусоподібних аналогових сигналів.

Для моделювання роботи швидкодіючого фібоначчієвого лічильника розроблено та описано спеціалізоване програмне забезпечення. Проведене моделювання підтвердило працездатність лічильника, правильність алгоритмів виконання лічби та розраховані аналітичним шляхом характеристики.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу розробки методів та засобів зменшення глітчів, що виникають під час цифроаналогового перетворення. Основні результати досліджень є такими:

1. Досліджено вплив глітчів на швидкість порозрядного аналого-цифрового перетворення. В результаті дослідження показано негативні наслідки глітчів на динамічні характеристики ЦАП, особливо при збільшенні розрядності перетворювача.

2. Вперше запропоновано метод зменшення глітчів у генераторах пилкоподібних сигналів підвищеної лінійності. Суть методу полягає у застосуванні низькоглітчевого кодування у цифроаналогових перетворювачах з ваговою надлишковістю, що дозволяє зменшити перепади значень аналогової величини під час зміни вхідного коду квх. Доведено, що чим більшим є рівень цієї надлишковості, тим меншим є цей перепад у відносних одиницях.

3. Вперше розроблено математичну модель глітчів, що виникають у ЦАП із ваговою надлишковістю, особливістю якої є можливість її застосування для довільного числа розрядів, що дозволило оцінити час дії та амплітуду глітчів під час перемикання розрядів ЦАП.

4. Вперше запропоновано метод побудови швидкодіючих лічильників, особливість якого полягає у використанні для їх синтезу модифікованої системи числення Фібоначчі (МФ-системи числення), що дозволяє розширити діапазон лічби та зменшити кількість обладнання порівняно з відомою системою числення Фібоначчі, а також зменшити кількість перенесень (максимум до 5) порівняно із класичною двійковою системою числення. Такі лічильники є перспективними при використанні у різноманітних обчислювальних пристроях, зокрема вони є основою для побудови низькоглітчевих генераторів аналогових сигналів на основі фібоначчієвого цифроаналогового перетворювача.

5. Вперше запропоновано методику оцінювання ефективності застосування вагової надлишковості, критерієм якої є зменшення рівня глітчів у ЦАП та запропоновано оптимальні параметри систем числення, на основі яких побудовано ЦАП, що дає можливість досягти максимального результату при мінімальному подовженні розрядної сітки.

6. Розроблено загальні структурні схеми фібоначчієвих лічильників у МФ-системі числення трьох видів: лічильник, що додає; лічильник, що віднімає; а також реверсивний лічильник та структурні схеми їх окремих розрядів. Наведено часові діаграми запропонованих лічильників, що пояснюють їх роботу та підтверджують працездатність. Проведено аналіз наведених структурних рішень і часових діаграм, виконана оцінка апаратних витрат і швидкодії розроблених лічильників.

7. Запропоновано структуру низькоглітчевого ЦАП на основі систем числення із ваговою надлишковістю, а саме з дробовими вагами розрядів, зокрема, р-кодів золоті пропорції, та цілочисловими вагами розрядів, зокрема, р-кодів Фібоначчі.

8. Розроблено структурні і принципові схеми двотактних підсилювачів постійного струму (ДППС) з параметричним коригуванням зсуву нуля та з вхідним каскадом на польових транзисторах. Доведено, що використання запропонованих високолінійних і швидкодіючих схем ДППС дозволить покращити статичні і динамічні характеристики ЦАП (на 1-2 порядки) та багаторозрядних цифроаналогових систем (в 2-3 рази) у цілому.

9. Запропоновано структурні схеми генераторів пилкоподібних сигналів підвищеної лінійності на основі фібоначчієвого цифроаналогового перетворювача та з використанням швидкодіючих фібоначчієвих лічильників. Надано опис структурної організації таких генераторів та функціональних схем їх лічильників, а

також детально розглянута та проаналізована їх робота. Обґрунтовано, що використання запропонованих генераторів у порівнянні з відповідними рішеннями на основі двійкової системи числення дозволяє підвищити швидкодію та зменшити рівень глітчів у процесі генерування аналогових сигналів, що змінюються лінійно.

10. Розроблено та описано програмні засоби для моделювання роботи швидкодіючих фібоначчієвих лічильників. Проведене комп'ютерне моделювання підтвердило розраховані аналітичним шляхом характеристики вказаного лічильника.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] O. D. Azarov; O. G. Murashchenko; O. I. Chernyak; A. Smolarz; and G.Kashaganova, "Method of glitch reduction in DAC with weight redundancy". *SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications 2015*, 98161T (17 December 2015).

[2] O. D. Azarov, O. G. Murashenko, S. S. Katsiv, K. Gromaszek, G. Duskazaev, and O. Ussatova, "Mathematical model of glitches in DAC with weight redundancy", *Proc. SPIE 11045, Optical Fibers and Their Applications 2018*, 1104511 (15 March 2019).

[3] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, та О. Г. Муращенко. "Метод побудови швидкодіючих фібоначчієвих лічильників", *Проблеми інформатизації та управління*, № 2(46), с. 5-8, 2014.

[4] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, та О. Г. Муращенко, "Інформаційні аспекти лічби у модифікованій фібоначчієвій системі числення", *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. - №1(38), с. 48-52, 2017.

[5] О. Азаров, О. Черняк, та О. Муращенко "Методи перенесення і запозичення у швидкодіючих фібоначчієвих лічильниках", *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, №2(42), с. 55-63, 2018.

[6] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, та О. Г. Муращенко, "Швидкодіючий реверсивний фібоначчієвий лічильник", *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, №1(32), с. 27-32, 2015.

[7] О. Д. Азаров, О. В. Кадук, О. В. Дудник, та О. Г. Муращенко, "Пряме і зворотне перетворення «робочий код – цифровий еквівалент» у АЦП і ЦАП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю", *Проблеми інформатизації та управління*, №2(30), с. 6-13, 2010.

[8] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, та О. Г. Муращенко, "Порозрядне додавання в АМ-системах числення на основі адитивних перетворень", *Проблеми інформатизації та управління*, №1(45), с. 14-21, 2014.

[9] О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, О. Г. Муращенко, та М. Ю. Теплицький, "Структурна організація АЦП з прогресуючими тривалостями тактів порозрядного наближення", *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. №2, с. 6-13, 2010.

[10] О. Д. Азаров, М.Ю. Шабатура, та О.Г. Муращенко, "Динамічні похибки II роду в АЦП прискореного порозрядного наближення з ваговою надлишковістю", *Наукові Праці Вінницького Національного Технічного Університету*, №3, с. 9, 2010. [Електронний ресурс], Доступно: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/219>.

[11] О. Д. Азаров, О. О. Лукашук, В.Г. Огнєв, О. Г. Муращенко, та О.М. Хорьков, заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет, “Підсилювач постійного струму”, № 21203, Україна, МПК: H03F 3/26, 15.03.2007.

[12] О. Д. Азаров, С. В. Богомоллов, В.Є. Яцик, та О. Г. Муращенко, заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет, “Двотактний симетричний підсилювач струму”, №70121, Україна, МПК: H03F 5/22, 25.05.2012.

[13] О. Д. Азаров, С. В. Богомоллов, М.В. Пономарьова, та О. Г. Муращенко, заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет, “Вхідний пристрій схеми порівняння струмів”, №72312, Україна, МПК: H03F 5/00, 10.08.2012.

[14] О. Д. Азаров, О. І Черняк., та О. Г. Муращенко, заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет, “Лічильник, що віднімає у фібоначчєвій системі числення”, №97829, Україна, МПК H03K 23/00, 10.04.2015.

[15] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, О. Г. Муращенко, та С. В. Богомоллов, заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет, “Цифроаналоговий перетворювач”, №94085, Україна, МПК: H03M 1/46, 27.10.2014.

[16] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, та О. Г. Муращенко, заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет, “Цифроаналоговий перетворювач”, №109785, Україна, МПК H03M 1/46, 12.09.2016.

[17] О.Д. Азаров, О.В. Черняк, та О.Г. Муращенко, заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет, “Реверсивний лічильник у фібоначчєвій системі числення”, №109080, Україна, МПК H03K 23/00, H03M 7/00, 10.08.2016.

[18] О. Д. Азаров, О. І. Черняк, О. Г. Муращенко, “Лічильник”, №127185, Україна, МПК H03M 1/46, 25.07.2018.

[19] О. Д. Азаров, О. Г. Муращенко, “АЦП порозрядного наближення з антиглітчєвим кодуванням”, на Міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія”, Вінниця, 2010.

[20] О. Д. Азаров, та О. Г. Муращенко, “Метод антиглітчєвого кодування в АЦП порозрядного наближення”, на Міжнародній науково-практичній конференції “Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації”, Вінниця, 2011.

[21] О. Д. Азаров, та О. Г. Муращенко, “Метод зменшення глітчів у ЦАП із ваговою надлишковістю”, на Міжнародній науково-практичній конференції “Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації”, Вінниця, 2017.

[22] О. Д. Азаров, та О. Г. Муращенко, “Дослідження глітчів ЦАП залежно від рівня надлишковості р-кода Фібоначчї”, свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №54904, 20.05.2014.

[23] О. Д. Азаров, та О. Г. Муращенко, “Дослідження глітчів ЦАП залежно від затримок вмикання і вимикання розрядів”, свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №54903, 20.05.2014.

## АНОТАЦІЯ

**Муращенко О. Г. Метод та засоби генерування пилкоподібних сигналів на базі ЦАП із низькоглітчевим кодуванням. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2020.

Проведено аналіз існуючих математичних моделей глітчів у ЦАП та показано їх недосконалість та неточність. Розглянуто негативний вплив глітчів на динамічні похибки в ЦАП та на швидкість Ц-А перетворення.

Запропоновано метод зменшення глітчів у генераторах пилкоподібних сигналів підвищеної лінійності. Складено та проаналізовано математичну модель глітчів в ЦАП із ваговою надлишковістю. Доведено доцільність застосування ЦАП на основі СЧВН, зокрема р-кодів золотої пропорції та р-кодів Фібоначчі.

Запропоновано метод побудови швидкодіючих лічильників із використанням модифікованої системи числення Фібоначчі (МФ-системи числення), що дозволяє розширити діапазон лічби та зменшити кількість обладнання. Оцінено ефективність застосування вагової надлишковості для зменшення рівня глітчів у ЦАП та запропоновано оптимальні параметри систем числення, на основі яких побудовано ЦАП. Розроблено загальні структурні схеми кожного виду лічильника та структурні схеми їх окремих розрядів.

Розроблено структурні і принципові схеми двотактних підсилювачів постійного струму (ДППС) з параметричним коригуванням зсуву нуля та з вхідним каскадом на польових транзисторах. Запропоновано структурну організацію генераторів аналогових сигналів на основі фібоначчієвого ЦАП та з використанням швидкодіючих фібоначчієвих лічильників. Розроблено програмні засоби для моделювання роботи швидкодіючих фібоначчієвих лічильників.

*Ключові слова:* генератори пилкоподібних сигналів, цифроаналогове перетворення, глітч в ЦАП, надлишкові позиційні системи числення, лічильники в кодах Фібоначчі.

## АННОТАЦИЯ

**Муращенко А. Г. Метод и средства генерации пилообразных сигналов повышенной линейности на базе ЦАП с низкоглитчевым кодированием. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 «Компьютерные системы и компоненты» – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2020.

Проанализировано существующие математические модели глитчей в ЦАП и показано их неточность. Рассмотрено негативное влияние глитчей на динамические погрешности в ЦАП и на скорость Ц-А преобразования.

Предложено метод снижения глитчей в генераторах пилообразных сигналов повышенной линейности. Составлено и проанализировано математическую модель

глитчей в ЦАП с весовой избыточностью. Доказано целесообразность ЦАП на основе ССВИ, в частности р-кодов золотой пропорции и р-кодов Фибоначчи.

Предложено метод построения быстродействующих счетчиков с использованием модифицированной системы счисления Фибоначчи (МФ-системы), что позволяет расширить диапазон счета и уменьшить количество оборудования. Оценено эффективность использования весовой избыточности для уменьшения глитчей в ЦАП и предложено оптимальные параметры систем счисления. Разработано обобщенные структурные схемы счетчиков каждого вида, а также схемы их отдельных разрядов.

Разработано структурные и принципиальные схемы двухтактных усилителей постоянного тока (ДУПП) с параметрической корректировкой сдвига нуля и с входным каскадом на полевых транзисторах. Предложено структуру генераторов аналоговых сигналов на основе фибоначчиевого ЦАП и с использованием быстродействующих фибоначчиевых счетчиков. Разработано программные средства для моделирования работы быстродействующих фибоначчиевых счетчиков.

*Ключевые слова:* генераторы пилообразных сигналов, цифроаналоговое преобразование, глитчи в ЦАП, избыточные позиционные системы счисления, счетчики в кодах Фибоначчи.

## ABSTRACT

***Oleksandr G. Murashchenko. Method and tools for high-linear ramp generation based on DAC with weight redundancy. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.***

Thesis for the degree of candidate of technical science in specialty 05.13.05 “Computer systems and components”. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2020.

This dissertation work is devoted to the development of methods and means of high linearity ramp generation based on DAC with low-glitch coding. The aim of the research is to improve the linearity of digital ramp generators, which differs from the existing in application of low-cellular coding based on DAC with weight redundancy.

The analysis of existing mathematical models of glitches in DAC was performed and their imperfection and inaccuracy are shown, which limits the possibility of their usage in the development and analysis of DACs and systems based on them. The impact of glitches on the dynamic errors in the DAC and on the speed of bitwise analog-to-digital conversion is considered and their negative effects on the dynamic characteristics of the DAC are shown, especially with increasing the bit capacity of the converter. The analysis of traditional methods and means of reducing glitches in DAC was performed and their disadvantages were pointed out. It is shown how these disadvantages lead to one or more of the following negative consequences: reduction of the DAC performance, increase of dynamic errors of the converter, increase of equipment quantity, increase of algorithmic complexity of transformation.

The method for reducing glitches in high linearity ramp generators is proposed, a feature of which is the use of low-glitch coding based on DAC with weight redundancy.



The mathematical model of glitches in DAC with weight redundancy has been developed that allows you to estimate the duration and amplitude of glitches while switching DAC bits depending on various factors, such as: parameters of key elements, number of bits, amplitude of control signals and load resistance. The analysis of the specified mathematical model was performed. The causes and specifics of the occurrence of glitters in  $\alpha$ -DAC were considered. It has been shown that the appearance of glitches in the DAC significantly limits the possibility of its use, in particular, in the direct digital synthesis of analog signals. Using the proposed mathematical model, it was proved that the amplitude of the glitch is significantly influenced by the control voltage of the DAC and the parasitic capacities of the digital keys, and the value of the load resistance significantly affects the damping time (duration) of the glitch.

The expediency of using DAC based on weight redundancy has been proved, in particular with fractional digit weights of bits, namely golden  $p$ -ratio numbers, with whole number weights of bits, namely Fibonacci  $p$ -codes. It was proved that with increasing of  $p$  parameter, the characteristics of glitches are greatly improved, and the amplitude and time of their attenuation decrease. A structural diagram of a low-glitch DAC based on a modified Fibonacci calculus system (MF calculus) was proposed.

The efficiency of the use of weight redundancy to reduce the level of glitches in the DAC was evaluated and the optimal parameters of the numerical systems on the basis of which the DAC was built were proposed. It was proved that the use of  $p = 3$  of the Fibonacci code and  $p = 3$ ,  $p = 4$  of the golden ratio codes is optimal.

Further development took the approach to modify the Fibonacci calculus system. A modified Fibonacci calculus system (MF-system) is proposed for the construction of high-speed counters, which is characterized by an extension of the digit range, which makes it possible to reduce the number of equipment when constructing mentioned counters. A formal description of this system of calculus is given using the alphabet and the Fibonacci ratio, which specifies the basis, and the methods of counting in it are proposed. The proposed calculus system has less redundancy than the known Fibonacci calculus system. The rules for representing integers in the MF calculus system are described. The statement about the limitation of the length of the transfer, which can occur at each cycle, which leads to an increase in the speed of the counting, is proved.

On the basis of theoretical research, the method for the construction of high-speed Fibonacci counters in the MF-system of calculus of three types was first proposed: the adding counter, the subtracting counter and the reversing counter. The general schemes of the structural organization of each type of counter and the schemes of the structural organization of their individual digits have been developed.

Structural and schematic diagrams for two-stroke DC amplifier have been developed. The use of the proposed high-linear and high-speed two-stroke DC amplifier circuits will improve their static and dynamic characteristics and multi-bit analog-digital systems as a whole.

Recommendations for the design of analog and digital ramp generators of high-line signals based on DAC with low-glitch coding were provided on the basis of the methods and tools proposed in this work. The structural organization of the generators of the specified analog signals based on the Fibonacci digital-to-analog converter and using high-speed Fibonacci counters is proposed. The structural organization of such generators and

the functional circuits of their meters are described, and their work is reviewed and analyzed in detail. It is substantiated that the use of the proposed generators in comparison with the corresponding solutions based on the binary number system allows to increase the speed and reduce the level of glitches in the process of generating analog signals that change linearly.

The development of software for modeling the operation of high-speed Fibonacci counters is described. The simulation confirmed analytically calculated characteristics.

*Key words:* Ramp generators, Digital to Analog converters, glitches in DAC, redundant positional number system, Fibonacci counters.



Підписано до друку 25.02.2020 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