

**ФАЗОВЕ КОЛО ЯК ОСНОВА КЛАСИФІКАЦІЇ
ПРЯМИХ СИНТЕЗАТОРІВ ЧАСТОТИ**

В роботі проведено аналіз математичних моделей фазочастотних синтезаторів. Для класифікації синтезаторів запропоновано використовувати поняття фазового кола прямого цифрового синтезатора частоти, яке є інтерпретацією поняття повної фази синтезованого сигналу. В роботі підтверджено адекватність пропонованого методу класифікації шляхом аналізу існуючих методів прямого синтезу. Запропоновано метод побудови прямих цифрових обчислювальних синтезаторів на основі кодів Фібоначчі. Підхід до проектування синтезаторів, що запропонований у даній роботі, може бути використаний для формування синтезаторів із унікальними характеристиками.

Ключові слова: обчислювальний синтезатор частоти, фазове коло, ЦОС.

O. POLIKAROVSKYKH
Khmelnytsky National University

PHASE WHEEL AS THE BASIS FOR CLASSIFICATION OF DIRECT FREQUENCY SYNTHESIZERS

In the paper, an analysis of mathematical models of phase-frequency synthesizers was proposed. For classification synths proposed to use the concept phase range direct digital frequency synthesizer which is an interpretation of the concept of the total phase of the synthesized signal. In this paper confirmed the adequacy of the proposed classification method by analyzing the current methods of direct synthesis. The method of construction of the direct digital synthesizer based computing Fibonacci codes. The approach to designing synthesizers that proposed in this paper can be used to create synths from unique characteristics.

Keywords: direct frequency synthesizer, DDS, phase wheel

Вступ

Прямі цифрові синтезатори частоти відіграють важливу роль в сучасних радіоелектронних пристроях. Це забезпечується багатьма значними перевагами: швидкість переналаштування частоти, висока розрізняльна здатність, широка синтезована смуга частот. Багаторівневі DDS у силу своєї, технологічності, надійності, можливості мікромініатюризації та унікальності технічних характеристик (нерозривність фази під час перемикавання з частоти на частоту, можливість формування сигналів складної форми, цифрове керування амплітудою, частотою та фазою вихідного коливання) на сьогодні знайшли застосування у системах зв'язку. Особливо перспективним є використання DDS у радіотехнічних системах передачі інформації з підвищеною завадостійкістю та захищеністю. Одним з обмежуючих факторів за максимальною швидкістю та якісним спектральним складом таких синтезаторів є швидкість окремих арифметичних операцій в ядрі цифрового синтезатора [1].

Особливістю синтезаторів прямого синтезу є те, що частота, амплітуда та фаза сигналу, що сформовані на їх виході, відомі для будь-якого моменту часу і можуть бути запрограмовані. Параметри таких синтезаторів практично не залежать від температури і старіння елементів. Єдиним елементом який, має притаманну аналоговим системам нестабільність є цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Завдяки відмінним технічним характеристиками і високій швидкості переналаштування частоти та фази прямих цифрові синтезатори (DDS) набувають все ширшого застосування. Основними перевагами синтезаторів є: високе розрізнення по частоті і фазі, швидке пере налаштування частоти (фази), переналаштування за частотою без розриву фази синтезованого сигналу і без викидів напруг на виході, можливість програмним методом впливати на модуляційні характеристики сигналів синтезаторів [1, 2].

Формулювання цілей статті

В роботі необхідно розглянути математичні моделі, які лежать в основі поняття повного фазового зсуву синтезованого сигналу і провести класифікацію методів формування фазового кола цифрового обчислювального синтезатора

У роботі необхідно досягнути наступних цілей:

- провести аналіз математичних моделей цифрового фазового кола
- провести класифікацію методів формування фазового кола цифрового обчислювального синтезатора
- підтвердити адекватність пропонованого методу класифікації
- запропонувати нові методи побудови прямих цифрових обчислювальних синтезаторів на основі запропонованої класифікації.

Основна частина

Згідно з теорією фазочастотних вимірювань та перетворень радіосигналів (ФЧВ та ПР) [4] встановлюється, що моделлю радіосигналів є сигнал, виражений через повну фазу:

$$S(t) = A(t) \cos \Psi(t), \quad (1)$$

де $A(t)$ – закон зміни амплітуди; $\Psi(t)$ – повний фазовий зсув. Суть теорії полягає у визначенні

фазового зсуву не у межах $[-\pi; +\pi]$, а розширивши ці межі до нескінченності $[-\infty; +\infty]$, при цьому середня (спектральна) частота визначається інтегруванням на досить довгому інтервалі часу із нескінченно малою похибкою:

$$\omega_0 = \lim_{T_m \rightarrow \infty} \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} \omega(t) dt = \lim_{T_m \rightarrow \infty} \frac{\Psi(T_m)}{T_m}, \quad (2)$$

а миттєва, традиційно, за:

$$\omega = \frac{d\Psi(t)}{dt}. \quad (3)$$

Джерелом неадекватності багатьох класичних моделей сигналів є саме змішування цих понять, наприклад, парадокс альтиметра малих висот [4]. Вводячи узагальнене поняття ПФЗ, ми можемо уникати подібних хибних трактувань. Крім того, поняття частоти та класичного фазового зсуву (КФЗ), які були розділені для зручності розгляду та вимірювань у побудованих класичних моделях радіосигналів, узагальнюються та об'єднуються [4].

Повний фазовий зсув складається із двох частин: кута фазового зсуву (КФЗ); та N_{fc} – кількості фазових циклів(ФЦ):

$$d\Psi = 2\pi \left\{ Ent \left[\frac{\Psi(t)}{2\pi} \right] + Fr \left[\frac{\Psi(t)}{2\pi} \right] \right\} = 2\pi N_{fc} + \varphi(t). \quad (4)$$

Таке розуміння створює теоретичне обґрунтування теорії фазочастотних вимірювань та перетворень. Зазначений підхід дозволяє, не порушуючи усталених методів формування сигналів розробити нові можливості синтезу сигналів різноманітних діапазонів частот. В подальшому фазочастотне перетворення, яке базується на періодичній дискретній зміні фази сигналу будемо називати дискретне фазочастотне перетворення [4]. Цифрова реалізація такого способу – основа фазочастотного синтезу сигналів із різноманітними спектральними характеристиками. Отже, застосування фазочастотного синтезу органічно поєднується із визначенням ПФЗ та функціонуванням цифрових синтезаторів частоти.

Класифікація прямих цифрових синтезаторів частоти може бути проведена на основі поняття повної фази сигналу

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Psi}{dt}, \quad (5)$$

яке можна використовувати при аналізі синтезаторів частоти. А саме розглядати процес синтезу сигналу із заданими параметрами процес формування розгортки у часі $\Psi(t)$ і тоді кут нахилу лінії повної фази у координатах $[\Psi(t), t]$ буде визначати частоту синтезованого сигналу. Для сигналів меандрового типу можна розглядати зміни повної фази $\Psi(t)$, (рис.1) як апроксимацію ступінчастою функцією $S_f(t)$ неперервної функції $f(t)$, рис. 2.

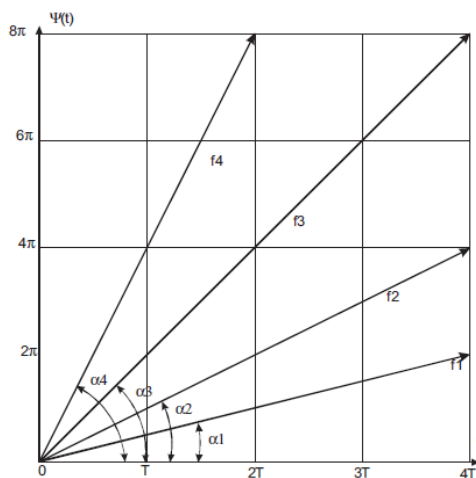


Рис.1. Графічна інтерпретація синтезу заданої частоти на основі поняття «повної фази сигналу» [4]

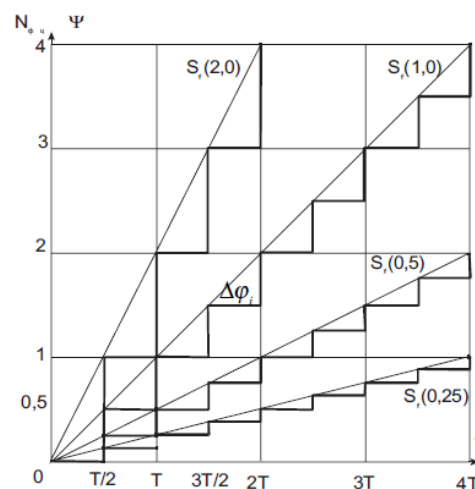


Рис.2. Графічна інтерпретація ступінчастої апроксимації функції частоти $f(t)$

Отже, процес синтезу частоти може бути інтерпретований, як апроксимація гладкої лінійної функції $f(t)$ із нахилом α певною ступінчастою функцією $S(t)$. Для якісного синтезу необхідно забезпечити максимальну гладкість функції $S(t)$.

У сучасних прямих цифрових синтезаторах частоти (DDS) для формування відліків фази використовується накопичувач коду (як правило на основі накопичувального суматора), який задає необхідні умови переналаштування фази і таким чином забезпечує фазочастотний синтез сигналу із заданою середньою частотою.

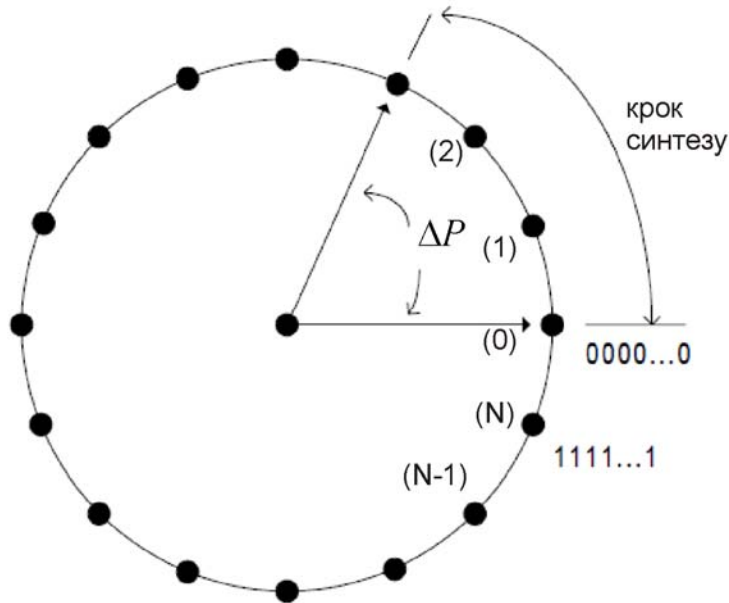


Рис.3. Цифрове фазове коло прямого цифрового синтезатора частоти

Зазвичай фазовий акумулятор складається з регістра частоти розрядністю j , який зберігає значення частоти, що потрапляє на повний суматор результат роботи котрого заноситься у регістр фази. З кожним тактом f_{clk} опорної тактової частоти значення слова фази додається до даних, що зберігаються у регістрі фази. Значення P являє собою кут фази, який додається до попереднього значення кожні $1/f_{clk}$ секунди, та формує лінійно зростаючу цифрову послідовність. Значення фази формується у результаті переповнення фазового акумулятора розрядністю j -біт. Частота переповнення фазового акумулятора визначає вихідну частоту синтезатора відповідно до виразу:

$$f_{out} = \frac{\Delta P f_{clk}}{2^j}, \quad (6)$$

де ΔP – слово приросту фази, j – кількість біт акумулятора фази, f_{clk} – опорна тактова частота, f_{out} – вихідна частота синтезатора. При цьому завжди виконується:

$$f_{out} \leq \frac{f_{clk}}{2}, \quad (7)$$

у відповідності до теореми Котельникова [2]. У випадку повного фазового циклу $\Delta P = 1$, вираз 6 дає можливість обчислити розрізнявальну здатність синтезатора:

$$\Delta f = \frac{f_{clk}}{2^j}. \quad (8)$$

У блоці перетворення фази на амплітуду (постійному запам'ятовуючому пристрої ROM) з таблиці синусу приріст значення фази перетворюється у цифрові значення амплітуди синусоїдального коливання. У ідеальному випадку значення амплітуди з таблиці може бути представлено у виді:

$$S(n) = \sin\left(2\pi \frac{P(n)}{2^j}\right), \quad (9)$$

де $P(n)$ – це значення фазового регістру розрядністю j на n -му такті вхідної частоти.

Отже із структурної схеми на рис.4 та опису роботи прямого цифрового синтезатора зрозуміло, що DDS реалізує принципи фазочастотного синтезу сигналів, проте є лише одним із випадків, які можуть бути використані для такого роду синтезу. Замість фіксованих точок фазового кола $[0,1,2,\dots,N-1,N]$ у класичному синтезаторі використані їх еквіваленти у коді Радемахера $[0000,0001,0010,\dots,1110,1111]$. Зрозуміло, що для представлення фіксованих точок фазового кола $[0,1,2,\dots,N-1,N]$ можуть бути використані інші кодові системи (Грея, Фібоначчі, Галуа...), а також ці точки фіксованого фазового кола можуть бути представлені у вигляді часових затримок імпульсів, або наборів функцій певного виду (Уолша,

Хаара).

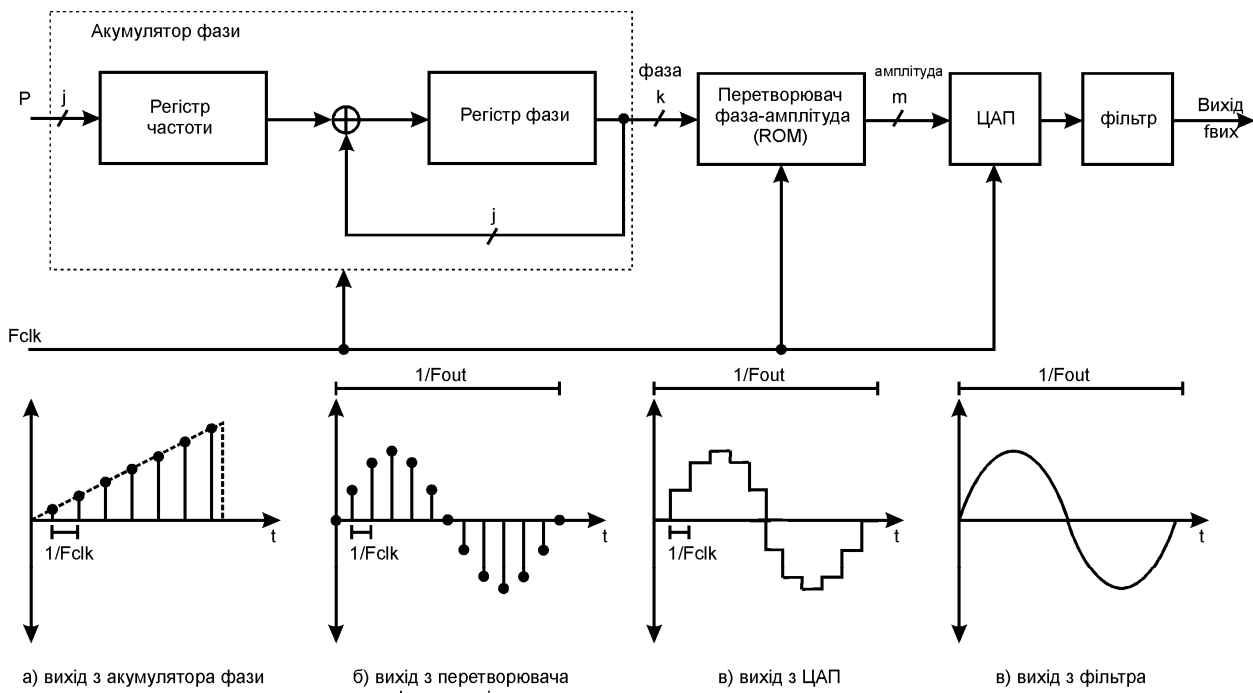


Рис. 4. Структурна схема класичного DDS, та перетворення сигналів у ньому

Докладно розглянемо класифікацію таких способів представлення фазового кола. Вона може бути розроблена на основі 3-х груп методів (рис. 5): 1. Підсумовування кодів різної структури (Радемахера, Фібоначі, Грея, Хемінга...). 2. Методів додавання імпульсних послідовностей (прорідженням тактових послідовностей, додаванням імпульсних послідовностей із зсувом...). 3. Методів кодування точок фазового кола певною конкретною фазовою функцією.

За цією класифікацією класичний цифровий синтезатор [1] відноситься до цифрових обчислювальних синтезаторів із підсумовуванням кодів Радемахера. Широко відомими є і випускаються цифрові обчислювальні синтезатори на основі додавання імпульсних послідовностей, які є основою Fractional/ Integer-N синтезаторів [3].

Проведемо аналіз інших методів формування фазового кола. Для прикладу візьмемо метод підсумовування кодів Фібоначі. Вже більш трьох десятиліть в обчислювальній математиці існує розділ, названий "безпохибковими обчисленнями". Теорія безпохибкових обчислень має справу з задачами, для яких вхідна інформація є набором цілих чисел, а розв'язання є раціональною функцією від цих чисел. При дискретизації вихідної задачі, вхідні дані, що є дійсними числами, апроксимуються раціональними числами, які, у свою чергу, відображаються в цілі числа. Оскільки діапазон вхідних, проміжних і вихідних даних часто буває великим (від 2^{-128} до 2^{128} і більш), то виникає необхідність у великій кількості розрядів машинного зображення цілих чисел [5]. Це ускладнює побудову підсумовувача кодів – фазового акумулятора у порівнянні з фазовим акумулятором на основі кодів Радемахера, проте ми можемо отримати значний вииграш у вихідному блоці синтезатора, а саме в цифро-аналоговому перетворювачі цифрового обчислювального синтезатора. Такі ЦАП розроблені у м. Вінниця СКТБ "Модуль". Цим розробкам передувала велика наукова робота. Дослідження проведені Вінницькою школою АЦП/ЦАП переконливо показали, що застосування кодів Фібоначі дозволяє одночасно поліпшити всі технічні параметри АЦП і ЦАП, зокрема точність, швидкодію і, найголовніше, температурну і часову метрологічну стабільність АЦП і ЦАП.

Як відомо, в АЦП і ЦАП, побудованих на основі класичної двійкової системи числення, можлива поява "розривів" передавальної характеристики, які можуть виникнути в результаті відхилення від номінальних значень резисторів двійкового подільника, що реалізує вагові коефіцієнти двійкових розрядів. У «фібоначієвих» АЦП і ЦАП "розрив" передавальної характеристики автоматично виключається за рахунок багатозначності фібоначієвого представлення однієї і тієї ж величини. Всі "Фібоначієві" розряди розбиваються на групу старших розрядів, відхилення яких від номінальних значень призводить до істотного впливу на похибка перетворення, і групу молодших розрядів, незначно впливають на похибку перетворення. Якщо тепер під впливом технологічних, температурних або часових факторів (старіння елементів) відбуваються відхилення значень резисторів старших розрядів від номінальних значень, то, кодуючи одну і ту ж величину двічі (з включеним і виключеним старшим розрядом), по різниці результатів кодування можна визначити відхилення старшого розряду від номінального значення. Якщо цю ж процедуру виконати для наступного за старшинством розряду, то можна також обчислити відхилення чергового старшого розряду від власного номінального значення. Така коригуюча процедура проводиться в "Фібоначієва" АЦП перед кожним його включенням, що дозволяє кожного разу відновлювати його точність. Теоретичні та

експериментальні дослідження показали, що відхилення резистивних елементів від своїх номінальних значень можуть бути досить істотними (до 23 %). При цьому шляхом корекції похибка АЦП і ЦАП може бути знижена в 1000 разів і більше. У реальних розробках допускалася похибка резистивних елементів в 5%, а похибка АЦП і ЦАП при цьому відповідала 0,005 % і нижче. Таким чином, в Ф-АЦП і Ф-ЦАП різко знижувалися вимоги до технологічної точності виготовлення резистивного дільника. Крім того, якщо під впливом температури або старіння відбувалися відхилення елементів резистивного дільника від номінальних значень, то вони також коректувалися за допомогою описаної вище процедури. В результаті досягалося вельми суттєва перевага – Ф-АЦП і Ф-ЦАП виявлялися нечутливими до технології виготовлення, температури і старіння.

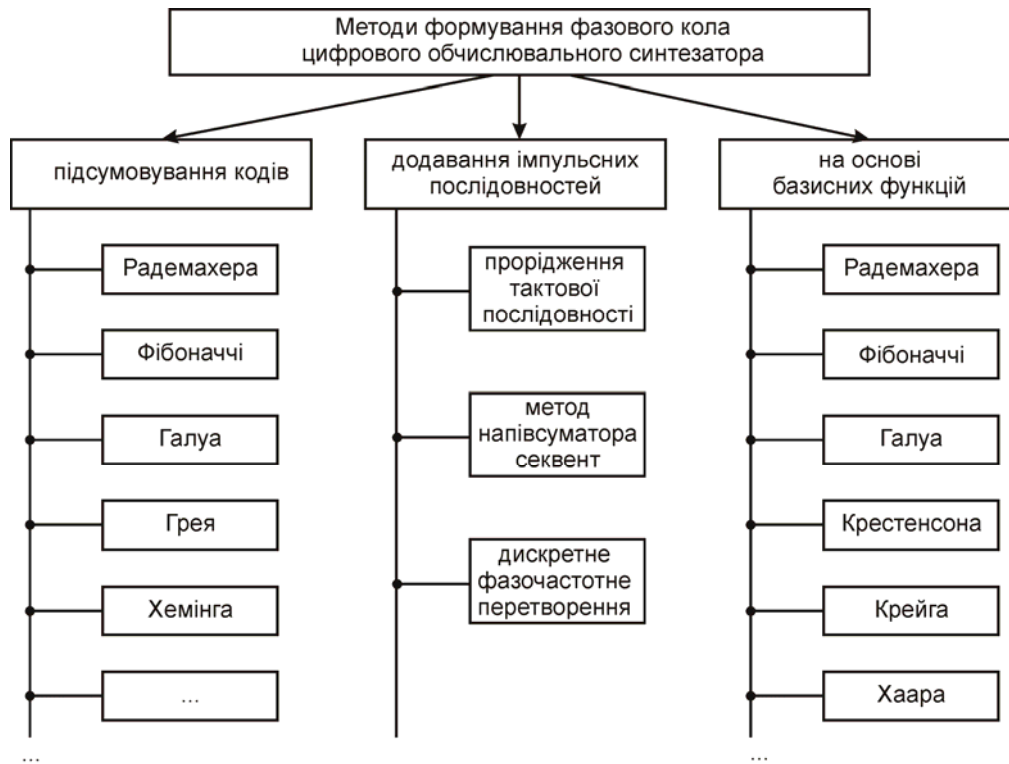


Рис. 5. Класифікація методів формування фазового кола цифрового обчислювального синтезатора

Розглянемо більш докладно метод формування фазового кола цифрового обчислювального синтезатора на основі підсумовування кодів Галуа [11].

В роботі [6] проаналізовано побудову суматора на основі теоретико-числового базису Галуа, який дозволяє реалізувати підсумовування кодів без переносів.

Аналіз структури операційного пристрою сумування в базисі Галуа показує, що він характеризується регулярною архітектурою з часом затримки сигналів

$$T_{\Sigma G} = 3T_{LE} + \left(\frac{k}{4}\right)T_{LE},$$

де T_{LE} – час затримки одного логічного елемента, k – розрядність суматора.

Аналіз показує, що час затримки сигналів при виконання операції сумування в базисі Галуа дорівнює: $T_{\Sigma G} = 5T_{LE} + kQ_{LE}$, де $Q_{LE} = \frac{T_{LE}}{4}$. Оскільки дана затримка відповідає 4-м розрядам суматора, а при подвоєнні розрядності суматора в схему послідовно включається один додатковий елемент "виключне АБО", затримка сигналів може бути визначена для базисів Радемахера та Галуа відповідно:

$$V_{\Sigma R} = \frac{1}{3kT_{LE}} \quad (10)$$

$$V_{\Sigma G} = \frac{1}{5T_{LE} + kQ_{LE}} \quad (11)$$

З виразів (10, 11) випливають, що при використанні суматорів з розрядністю $k = 16-64$ швидкодія у базисі Галуа перевищує швидкодію суматорів у базисі Радемахера в 5–9 разів.

На рис.6.представлено структурну схему 4-х розрядного паралельного суматора Галуа із Галуа дешифратором для перетворення кодів Радемахера у коди Галуа і регістром проміжного результату. Для

систем прямого цифрового синтезу частот і сигналів (DDS) важливим структурним елементом є накопичувальний суматор, що являє собою суматор із регістром проміжного результату, вихід якого заведений на один з входів суматора. Отже, на рис.6 представлено структурну схему k -розрядного паралельного накопичувального суматора у кодах Галуа, який може бути застосований у обчислювальних синтезаторах прямого синтезу (DDS) дворівневих сигналів.

Для синтезу багаторівневих сигналів крім фазового акумулятора необхідно застосувати, ще перетворювач кодів Галуа у коди Радемахера, для адресації постійного запам'ятовуючого пристрою, що містить відліки синтезованого сигналу (як правило, гармонійного).

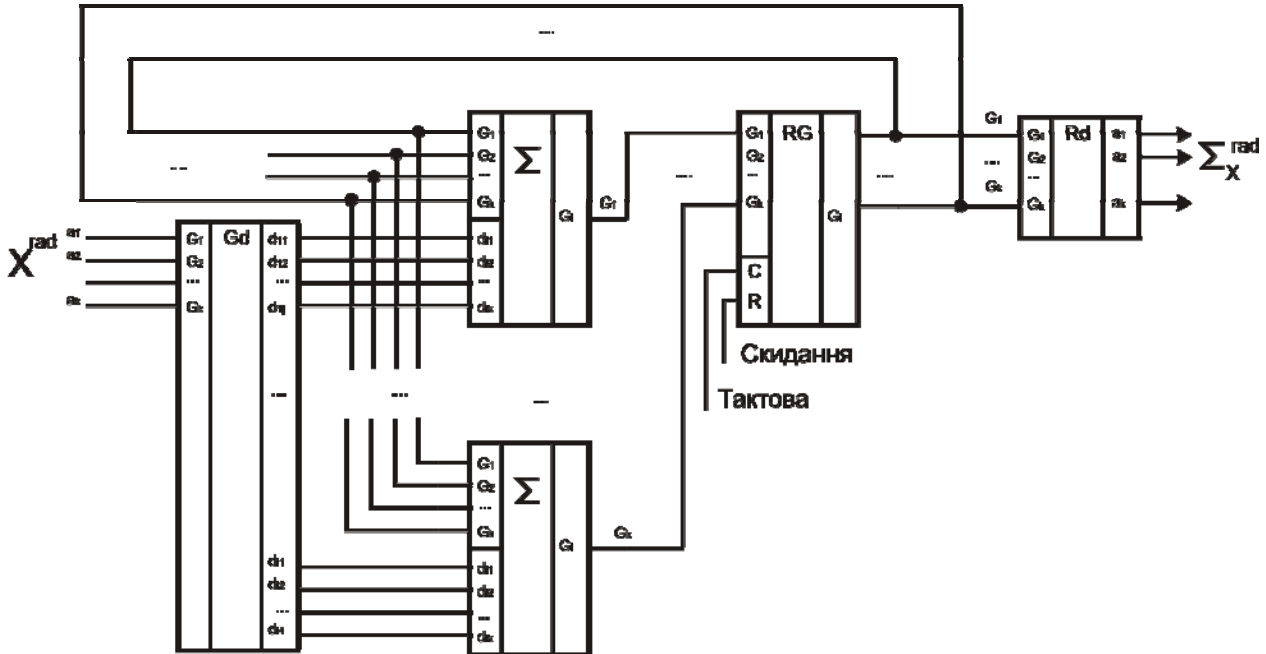


Рис. 6. Структурна схема k -розрядного паралельного накопичувального суматора у кодах Галуа з вихідним дешифратором у базис Радемахера.

Отже фазовим акумуляторам, що представлені на рис. 6, не буде властива проблема затримки сигналу переносу із розряду у розряд у процесі формування результуючого кодового слова, проте буде виникати затримка у шифраторі Радемахера-Галуа. Це не є проблемою, коли синтезатор формує певну незмінну частоту протягом 1-2-періодів сигналу.

Висновки

В роботі проведено аналіз математичних моделей фазочастотних синтезаторів. Показано, що основою такого аналізу є поняття повної фази радіосигналу. Запропоновано графічну інтерпретацію синтезу сигналів заданої частоти на основі поняття повної фази сигналу. Для класифікації синтезаторів запропоновано використовувати поняття фазового кола прямого цифрового синтезатора частоти, яке є інтерпретацією поняття повної фази синтезованого сигналу. В роботі підтверджено адекватність пропонованого методу класифікації шляхом аналізу існуючих методів прямого синтезу. Запропоновано метод побудови прямих цифрових обчислювальних синтезаторів на основі кодів Фібоначчі, що дасть можливість проектувати синтезатори нечутливими до технології виготовлення, температурі і старіння. А застосування кодів Галуа дасть можливість підняти швидкодію роботи тактового ядра синтезатора у 5–9 разів. Підхід до проектування синтезаторів, що запропонований у даній роботі може бути використаний для формування синтезаторів з унікальними характеристиками.

Література

1. Vankka J. Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications. Helsinki University of Technology. 2000. P. 192.
2. Макаренко В. Компоненти для построения беспроводных устройств святы. Часть 7. Синтезаторы частоты прямого цифрового синтеза / В. Макаренко // Электронные компоненты и системы. – 2010. – № 1. – С. 34–46.
3. Макаренко В. Фазоцифровые и частотно-цифровые синтезаторы частоты. Часть 1 / В. Макаренко // Электронные компоненты и системы. – 2012. – № 1. – С. 24–30.
4. Троцишин І.В. Вимірювання та перетворення фазочастотних параметрів радіосигналів / Троцишин І.В. – Хмельницький : ПП Ковальський В.В., 2002. – 382 с.
5. Лужецький В.А. Про один спосіб зображення дійсних чисел в ЦОМ / В.А. Лужецький, Мохаммад Аль-Майта // Вісник ВПІ. – 1997. – № 4. – С. 43–47.

6. Николайчук Я.М. Теоретичні засади та принципи побудови арифметико-логічного пристрою на основі вертикально-інформаційної технології / Я.М. Николайчук, О.М. Заставний, П.В. Гуменний // Вісник ХНУ. – 2012. – № 2. – С. 190–196.

7. Николайчук Я.М. Коды поля Галуа: теория та застосування : монографія / Николайчук Я.М. – Тернопіль : ТзОВ «Тернограф», 2012. – 576 с., іл.

8. Полікаровських О.І. Реалізація прямого цифрового синтезатора частоти із фазовим ядром на основі суматора у базисі Галуа / О.І. Полікаровських // Інформаційні технології. – 2013. – Том. 4. – С. 142–146.

References

1. Vankka J. Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications/ Vankka J. // Helsinki University of Technology. – 2000. – S. 192.

2. Makarenko V. Komponenty dlja postroenija besprovodnyh ustrojstv svjati. Chast' 7. Sintezatory chastoty prjamogo cifrovogo sinteza//Jelektronnye komponenty i sistemy.-2010.-№1.-S.34-46

3. Makarenko V. Fazo-cifrovye i chastotno- cifrovye sintezatory chastoty. Chast' 1 //Jelektronnye komponenty i sistemy.-2012.-№1.-S.24-30

4. Trocishin I.V. Vimirjvannja ta peretvorennja fazochastotnih parametriv radiosignaliv: - Hmel'nic'kij, PP Koval's'kij V.V. - 2002. – 382s.

5. Luzhec'kij V.A., Mohammad Al'-Majta. Pro odin sposib zobrazhennja dijsnih chisel v COM // Visnik VPI. – 1997. - № 4. - P. 43-47.

6. Nikolajchuk Ja.M, O.M. Zastavnij, P.V. Gumennij Teoretichni zasadi ta principi pobudovi arifmetiko-logichnogo pristroyu na osnovi vertikal'no-informacijnoj tehnologii / Nikolajchuk Ja.M. // Visnik HNU. – 2012. – № 2. – S. 190 – 196..

7. Nikolajchuk Ja.M Kodi polja Galua: teorija ta zastosuvannja./Monografija/ – Ternopil: TzOV «Ternograf», 2012.-576 s., il..

8. Polikarovs'kih O.I Realizacija prjamogo cifrovogo sintezatora chastoti iz fazovim jadrom na osnovi sumatora u bazisi Galua /Polikarovs'kih O.I. //Informacijni tehnologii.-2013.Tom.4.-S.142-146

Рецензія/Peer review : 25.9.2014 р.

Надрукована/Printed :1.10.2014 р.

Рецензент: д.т.н., проф. І.В. Троцишин