

## ЦИФРОВИЙ ГЕНЕРАТОР КВАДРАТУРНОГО СИГНАЛУ НА ОСНОВІ ПЛІС

Автор Ніколенко Д. В.

(науковий керівник — д.т.н., професор Дружинін В. А.)

Сучасні телекомунікаційні системи фактично не обходяться в своєму складі без високо стабільних генераторів частот, які ще зветься синтезаторами. Синтезом частот називають процес отримання одного або декількох коливань із заданими номінальними частотами з кінцевого числа еталонних коливань з фіксованими частотами. Опорне коливання, як правило, є в синтезаторі єдиним, отриманим від джерела із стабільною частотою і малими фазовими флуктуаціями [1,2].

Актуальною задачею в сфері побудови синтезаторів частот є розробка нових і удосконалення існуючих синтезаторів квадратурних складових, які у свою чергу мають застосування в складі генераторів квадратурних гармонійних сигналів для амплітудної квадратурної модуляції QAM в кабельних модемах, в стандарті цифрового телебачення DVB-C, у системах цифровому зв'язку тощо. Квадратурна модуляція використовується також у стандарті WIMAX.

Тож в роботі пропонується розробка для практичного використання: високостабільний цифровий генератор квадратурного сигналу, який можна використовувати або як окремий блок, або ж в складі модуляторів. І хоча даний генератор функціонує на частоті 20 кГц, його можна застосувати або ж разом з помножувачем частоти, або ж, як прототип для побудови генераторів з більшою частотою.

Комплексні сигнали широко використовуються в технічних пристроях, де окремо обробляються у вигляді пари синхронних і взаємозв'язаних сигналів – дійсної (Re, I, In-phase – синфазний канал) і уявної частини (Im, Q, Quadrature – квадратурний канал) комплексного сигналу [0].

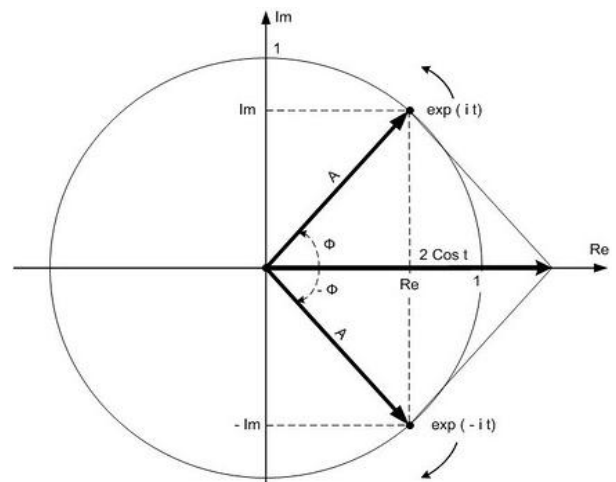
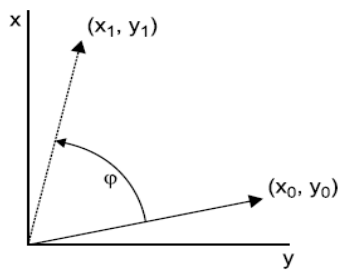


Рисунок 1. Ілюстрація формули Ейлера

Для обрахунку саме координат таких векторів можна застосувати CORDIC-алгоритм [0, 0]. Математичний базис якого полягає в тому, що для повороту вектора на кут  $\varphi$  використовують наступні співвідношення (1) та ітераційні формули (2):



$$\begin{aligned} x_1 &= \cos(\varphi) \cdot (x_0 - y_0 \cdot \tan(\varphi)), \\ y_1 &= \cos(\varphi) \cdot (y_0 + x_0 \cdot \tan(\varphi)). \\ \tan(\varphi) &= \pm 2^{-i} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \text{sign}(z_i), \\ x_{i+1} &= x_i - \sigma_i \cdot y_i \cdot 2^{-i}, \\ y_{i+1} &= y_i + \sigma_i \cdot x_i \cdot 2^{-i}, \\ z_{i+1} &= z_i - \sigma_i \cdot \arctan(z_i^{-i}). \end{aligned} \quad (2)$$

Що до структурних схем генераторів квадратурних сигналів, то їх можливі реалізації показано на рис. 2.

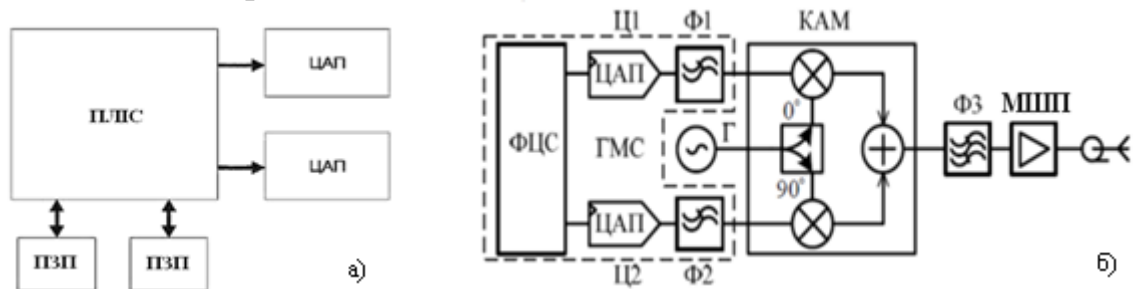


Рисунок 2. Типові структури генераторів квадратурних сигналів

Перша структура демонструє цифровий генератор, в якому відліки записані в ПЗП і зчитуються за алгоритмом, записаним в ПЛІС. Друга схема – частково аналогова, в якій формування квадратурного сигналу проводиться із двох цифрових шляхом зсуву на  $90^\circ$  [0].

Недоліком першої схеми є збільшення об’єму ПЗП при збільшенні точності апроксимації синуса і косинуса, а в другій аналогова частина вносить квадратурний дисбаланс. Виходячи з цього та аналізу аналогів [0-0], в роботі була побудована структурна схема генератора квадратурного сигналу на основі CORDIC-алгоритму, яка вільна згаданих недоліків.

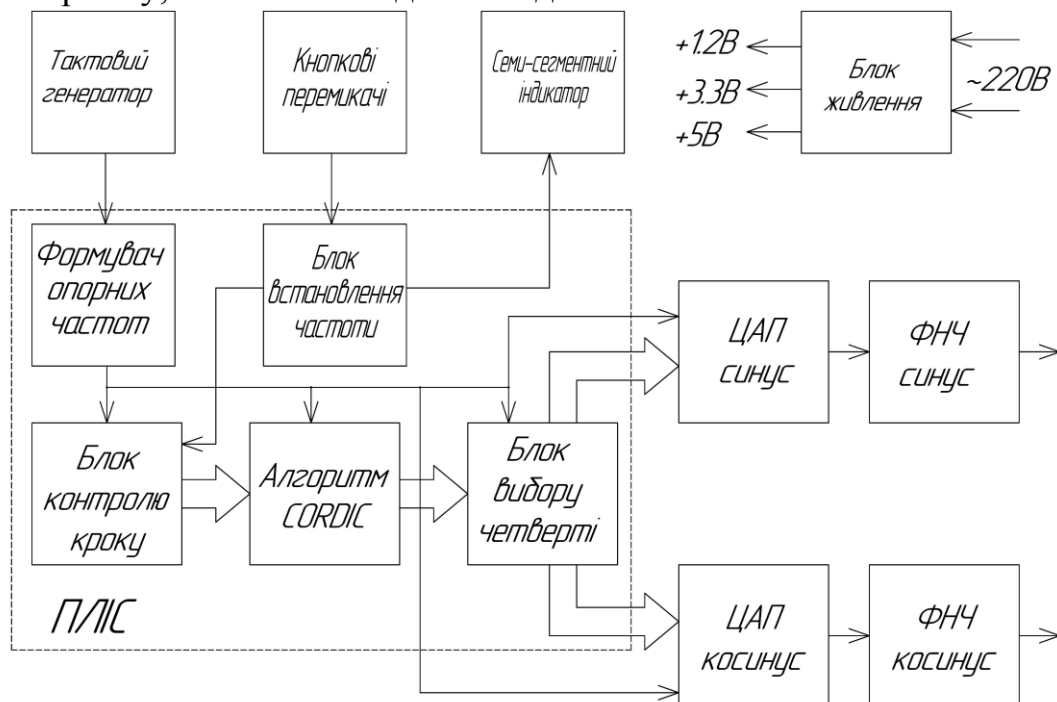


Рисунок 3. Структурна схема генератора квадратурного сигналу

Пристрій, структура якого наведена на рис. 3 має в своєму складі тактовий генератор, призначений для подачі імпульсів синхронізації стабільної частоти в 150 МГц на всі вузли синтезатора. Формувач опорних частот забезпечує подачу стабільних дискретних частот на вузли, що знаходяться в програмованій логічній інтегральній схемі (ПЛІС), яка забезпечує всю цифрову обробку сигналу. Блок контролю кроку формує кут (крок фази) для обчислення синуса та косинуса, а також задає код четверті, в якій знаходиться вихідний сигнал. Основу даного генератора складає блок формування сигналу за алгоритмом CORDIC. Даний алгоритм полягає у послідовному обчисленні кута положення на площині комплексного вектору, який обертається. Сам блок CORDIC формує конвеєр із блоків, що обчислюють проміжні значення синуса та косинуса (включаючи всі ітерації обчислень). Всі координати обраховуються тільки для першої чверті, а потім у блоці вибору четверті обчислене значення синуса та косинуса поширюється на весь діапазон ЦАП. Точність CORDIC-алгоритму для формування кута коливань складає  $0,05^0$  при розрядності 12 біт для кожного коливання. Вихідні відліки з блоку вибору четверті надходять на два 12-ти розрядні цифро-аналогові перетворювачі, перетворюються в аналоговий сигнал, фільтруються від високих гармонік у ФНЧ 2-го порядку типу Батервордта і на виході маємо рівень 0,2 В. Живлення генератора відбувається від стабілізованого блоку живлення +5В, самої ПЛІС від +3,3 В, а ядра ПЛІС – +1,2 В.

Для побудови електричної принципової схеми було використано ПЛІС типу FPGA фірми Altera сімейства Cyclone III – EP3C5T144C8. Внутрішня структура ПЛІС розроблена в САПР Quartus II як з використанням графічного редактора так і за допомогою окремих стандартних модулів на мові Verilog та VHDL. Блок опорних частот реалізовано на вбудованому модулі PLL – це спеціальний генератор зі схемою підстроювання частоти. У ньому реалізовано порівняння фаз сигналу вхідної частоти і сигналу вихідної частоти. Програмується ПЛІС через інтерфейс JTAG. А конфігурація для ПЛІС зберігається в ППЗП і завантажується в момент ввімкнення живлення.

Відповідно для отримання аналогового сигналу було встановлено швидкодіючі 12-розрядні ЦАП з подальшою фільтрацією. В даному генераторі частоту можна змінити за допомогою кнопоквих перемикачів, які підключені до регістра. А для її індикації встановлено семи-сегментний індикатор з динамічною індикацією з підключенням анодів через транзистори.

В роботі запропонований блок живлення на +5 В. Всі напруги забезпечуються параметричними стабілізаторами.

Відповідно до схеми електричної принципової розроблені двостороння плата друкована та складальне креслення з використання САПР PCAD та Компас 3D.

Таким чином, в роботі запропоновані шляхи оптимізації кількості ітерацій та крок зміни фази CORDIC алгоритму для реалізації генератора квадратурних сигналів на ПЛІС; удосконалено програмно-схемотехнічну реалізацію

пристрою шляхом збільшення частоти генерації та розробки схеми керування; отримали подальший розвиток методи проектування обчислювальних алгоритмів на основі ПЛІС.

### **Перелік посилань**

1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – Спб.: БХВ-Петербург, 2011. – 758 с.
2. Ридико Л. DDS: прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и Технологии. - 2001 г. - №17. - стр. 50-56.
3. Иванов М.Т. Сергиенко А.Б., Ушаков В.Н. Теоретические основы радиотехники. - М.: Высшая школа, 2002. - стр. 306.
4. Lakshmi B., Dhar A. S. CORDIC Architectures: A Survey // Journal: VLSI Design, January 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hindawi.com/journals/vlsi/2010/>.
5. Захаров А.В., Хачумов В.М. Алгоритмы CORDIC. Современное состояние и перспективы / А. В. Захаров, В.М. Хачумов // Програмные системы: Теория и приложения. – Переславль-Залесский, 2004. – С. 353-372.
6. Абраменко А.Ю., Гошин Г.Г. Структура универсального генератора сигналов / А.Ю. Абраменко, Г.Г. Гошин // Доклады ТУСУР. 2013. №3 (29). – С.5-9.
7. Дайнеко Д. Реализация CORDIC-алгоритма на ПЛИС / Д. Дайнеко // Компоненты и технологии. – 2011. – №12. – С. 36-46.
8. Шпилька Ю.Н., Душко А.А., Шпилька А.А. Повышение точности CORDIC-алгоритма / Ю.Н. Шпилька, А.А. Душко, А.А. Шпилька // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи. – Киев, 2014. – С. 45-47.
9. Тарасенков С.О. Исследование CORDIC-алгоритмов для программируемых логических интегральных схем // Современные научные исследования и инновации. 2018. – № 5 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2018/05/86560> (дата обращения: 24.09.2018).
10. Arora E.M., Chauhan E.R., Bagga E.L. FPGA prototyping of hardware implementation of cordic algorithm. International Journal of Scientific & Engineering Research, 2012, 3.1: 1.
11. Мороз Л.В., Борецький Т.Р., Костів Ю.М. Синус-косинусний FPGA-обчислювач на основі CORDIC-методу з перекодуванням кута // Науковий вісник НЛТУ України. – 2015. – № 25.6. – С. 288-297.

### **Анотація**

В роботі проведено ґрунтовний аналіз застосування CORDIC-алгоритмів для цифрової генерації коливань, розроблено структурне і принципове рішення генератора на основі ПЛІС, показано переваги його застосування.

Ключові слова: квадратурні сигнали, CORDIC-алгоритм, генерація, ПЛІС, квадратурна модуляція.

### **Abstract**

In this work a thorough analysis of the application of CORDIC algorithms for digital oscillation generation has been carried out, the structural and principle decision of the generator based on the FPGA has been developed, and the advantages of its application are shown.

Keywords: quadrature signals, CORDIC algorithm, generation, FPGA, quadrature modulation.