

## ЗАДАВАЧІ ЧАСТОТИ З ПРОГРАМНО-АПАРАТНИМ КЕРУВАННЯМ

### Вступ

Проблема побудови керованих задавачів частоти є актуальною для багатьох класів електронних систем. Це, насамперед, промислові та побутові системи керування, частотно-керований електропривод, перетворювачі електроенергії з різноманітними видами імпульсної модуляції, вимірювальні прилади, а також радіотехнічні системи.

Основні вимоги до задавачів частоти – це висока точність та стабільність, лінійність передатної характеристики, широкий діапазон, мале енергоспоживання, габарити та вартість. Розповсюдження цифрових систем на основі мікропроцесорів та програмованих логічних інтегральних схем спонукає до пошуку відповідних технічних рішень для задавачів частоти, в яких можливе *програмне керування*, тобто – зміна частоти вихідних імпульсів за допомогою позиційного двійкового коду, що виробляє система керування згідно з її алгоритмом.

Найкращім рішенням є застосування частотного синтезатора, який генерує багатократні частоти з однієї або більшої кількості опорних частот. Такі прилади вперше були використані в синтезаторах систем зв'язку. Застосування однокристальних мікроконтролерів (ОМК), які поєднують на одному кристалі введення і виведення аналогової інформації (АЦП, ЦАП, ШИМ-модулятори), а також реалізацію різних функцій часу (підрахунок подій за допомогою лічильників, формування часових затримок таймерами, генерація подій) дозволяє суттєво покращити техніко-економічні показники електронних систем. Однак з'являється деяка смислова невизначеність в питанні про те, що потрібно розуміти під термінами *«апаратна»* і *«програмна»* реалізація. Адже лічильники, регістри, дешифратори, таймери, логічні елементи, а також ЦАП і АЦП можуть бути реалізовані двояким чином: як з використанням зовнішніх радіоелектронних компонентів (РЕК), так і програмно.

Взагалі можна виділити чотири способи реалізації будь-якої функції керування за допомогою сучасної елементної бази, що використовується для побудови цифрових систем. Цими способами є апаратна, програмна, апаратно-програмна та програмно-апаратна реалізація. Розглянемо методи синтезу частоти крізь призму запропонованої класифікації.

# 1. Апаратна реалізація

Цей спосіб передбачає використання зовнішніх РЕК. Перший варіант синтезатора базується на змішуванні частот з виходів блоку генераторів, в яких застосовані кристалічні резонатори  $X1...Xn$  (рисунок 1). Можливе досягнення найвищої точності й швидкодії, які визначаються

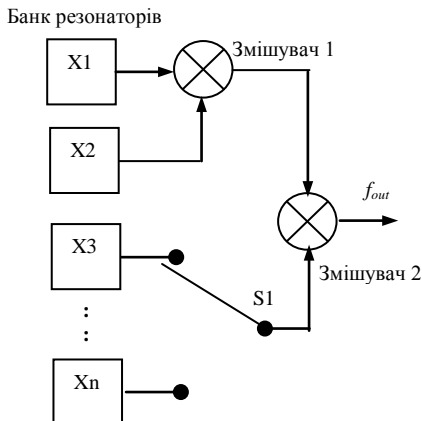


Рисунок 1 – Частотний синтез з використанням блоку генераторів

параметрами застосованих РЕК. Проте, такій реалізації властиві підвищені габарити та вартість, знижена надійність і гнучкість. ОМК практично не приймає участі в процесі синтезу, а тільки комутує генератори за допомогою ключа  $S1$ . Інший варіант апаратного синтезу частоти заснований на добре відомому методі з використанням замкненої петлі фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ – PLL). Дана відпрацьована технологія проілюстрована на рисунку 2. Фіксована опорна частота подається на один з входів фазового детектора. Інший

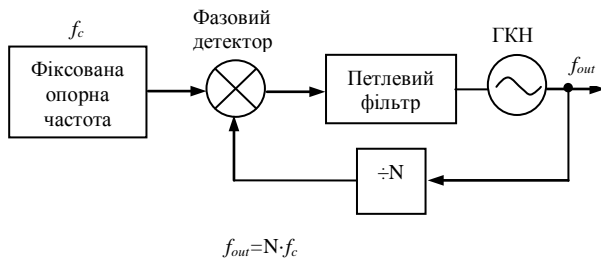


Рисунок 2 – Частотний синтез з використанням замкненої петлі фазового автопідстроювання частоти

вхід фазового детектора підключений до виходу лічильника-дільника на  $N$ , що контролюється генератором, керованим напругою ( $ГКН$ ). Негативний зворотний зв'язок призводить до установки виходу фільтра в таке значення, яке робить вихідну частоту  $ГКН$  в  $N$  раз меншою за опорну. Постійна часу кола зворотного зв'язку контролюється петльовим фільтром. В проектуванні ФАПЧ існує безліч проблем, основними з яких є наявність фазового шуму, обмежені як швидкість настройки, так і роздільна здатність по частоті та ін. [1 – 3].

## 2. Програмна реалізація

Програмна реалізація синтезу частоти є альтернативою попередньому способу. Задача вирішується виключно *програмним* шляхом за рахунок, наприклад, реалізації циклів затримки (рисунок 3). Цьому способу

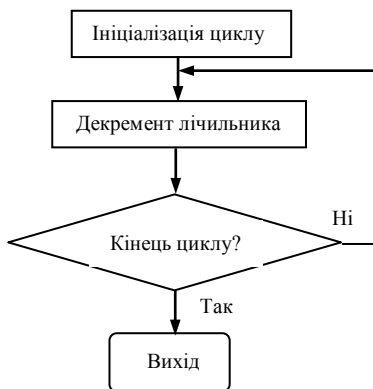


Рисунок 3 – Алгоритм програмної затримки

притаманна найвища гнучкість алгоритму керування, мінімальна вартість і максимальна надійність системи в цілому. Мінімальний період меандра, що синтезується, дорівнює тривалості виконання трьох-чотирьох команд ОМК: інверсії, виведення в порт, декремента та умовного переходу. Мінімальна частота майже не обмежена. Але в цьому випадку ОМК переважений другорядними (по відношенню до глобальної задачі управління процесом) діями, і в нього не залишається часу на оцінювання сигналів давачів, вироблення сигналів керування і т.д. В багатьох випадках це зумовлює серйозні обмеження по швидкодії, а отже, – якості системи керування.

### 3. Програмно-апаратна реалізація

Задачі керування зовнішніми об'єктами в цьому випадку вирішуються за допомогою *вбудованих* ресурсів ОМК (таймерів, лічильників та генераторів подій), режими яких задаються програмно однократно або в разі потреби. Наприклад, сучасні ОМК сімейства AVR фірми *Atmel* містять на кристалі до трьох таймерів-лічильників подій з розширеними функціями. Діапазон частот, які синтезуються, може складати

$$f_{CLK}/M > f_{out} > f_{CLK}, \quad (1)$$

де  $f_{CLK}$  – тактова частота ОМК (від одиниць до десятків мегагерців);

$M = 2^8 \dots 2^{16}$  – коефіцієнт ділення. Якщо долучити програмні способи розширення коефіцієнту ділення з застосуванням переривань, нижня частота генерації стає практично необмеженою.

Для побудови системи керування в цьому випадку потрібне мінімальне додаткове апаратне забезпечення (наприклад, формувачі сигналів). Це забезпечує низьку вартість, малі габарити і енергоспоживання пристрою. Час центрального процесора максимально вивільнений для рішення аналітичних задач, які виникають в ході керування складним реальним процесом. Можливості застосування цього способу залежать від номенклатури вбудованих в конкретний ОМК програмно-апаратних вузлів, а також мистецтва розробника з їх умілого використання. Цей варіант реалізації керуючої функції найкращим чином відповідає концепції прямого мікропроцесорного керування.

### 4. Апаратно-програмна реалізація

Для виконання певної функції цим способом найчастіше за все використовуються зовнішні вузли (ІМС) з програмним керуванням, які частково або цілком вирішують задачу. ОМК виконує програмну настройку потрібної ІМС. Це дозволяє суттєво вивільнити ОМК від рішення рутинних задач та забезпечити досить високу швидкодію. Одночасно можливе переналагоджування і зміна алгоритму.

Завдяки широкому використанню цифрових методів генерування багатократних частот від опорного джерела частоти з цифровим керуванням розвинулося в так званий *прямий цифровий синтез (DDS)*. У спрощеному варіанті стабільний тактовий сигнал керує постійним запам'ятовуючим пристроєм (PROM), в якому зберігаються коди амплітуд цілого періода синусоїди (або іншого періодичного сигналу). Коли лічильник адреси послідовно адресує кожний елемент пам'яті, відповідний код амплітуди сигналу з кожної комірки керує ЦАП, який по черзі генерує аналоговий вихідний сигнал. Спектральна чистота

кінцевого аналогового вихідного сигналу визначається ЦАП. Фазовий шум – той же, що і в тактовому сигналі.

Практична DDS-система виконує основну функцію гнучко і ефективно, використовуючи генератор з числовим керуванням. Функціональна схема модернізованої DDS-системи показана на рисунку 4.

Серцем системи є акумулятор фаз, вміст якого змінюється на

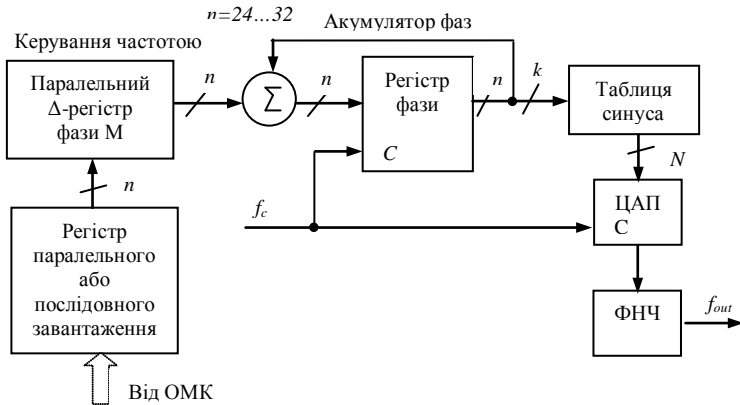


Рисунок 4 – Гнучка DDS-система

кожному періоді тактового сигналу. При оновленні акумулятора число  $M$ , що зберігається в регістрі приросту фази, додається до числа в регістрі накопичення фази.

Усічений  $k$ -розрядний вихід фазового акумулятора служить адресою таблиці значень синуса (або косинуса). Кожна адреса в таблиці відповідає фазовій точці синусоїди від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Комірки таблиці містять цифрову інформацію про амплітуду для певної фази, тобто відображають інформацію з акумулятора фази в цифрове слово, яке керує ЦАП.

Для  $n$ -розрядного фазового акумулятора (для більшості DDS систем  $n$  зазвичай лежить в діапазоні від 24 до 32), існує  $2^n$  можливих фазових точок. Цифрове слово в регістрі приросту фази  $M$  являє собою величину приростання фазового акумулятора на кожному періоді тактової частоти. Якщо  $f_c$  – тактова частота, то частота вихідної синусоїди дорівнює:

$$f_0 = \frac{M \cdot f_c}{2^n}. \quad (2)$$

У практичних DDS-системах вихід фазового акумулятора не прямо подається на таблицю пошуку, а усікається (залишають тільки старші значущі розряди). Це зменшує розмір таблиці пошуку і не впливає на роздільну здатність по частоті. Усікання фази додає малу (і прийнятну)

кількість фазового шуму у вихідний сигнал. Роздільна здатність ЦАП  $N$  вибирається на 2–4 розряди менше, ніж розрядність таблиці пошуку  $k$ . Розрахунок вихідного спектру для акумулятора фаз на 32 біти, усереднення фази до 15 біт і 12-бітного ЦАП свідчить, що спектральні сплески внаслідок обмежень на 90 дБ нижче розмаху вихідного сигналу [3].

Частота в DDS-системі може бути змінена без фазових стрибків за допомогою зміни вмісту  $M$ -регістра. З метою мінімізації числа виводів корпусу в DDS-мікросхемах передбачене завантаження слова задання частоти у внутрішній буферний регістр, який передує паралельному вихідному  $M$ -регістру. Після завантаження нового слова в буферний регістр вихідний паралельний регістр приросту фази тактується, що дозволяє змінити всі біти одночасно. Тактова частота (швидкість вибірки) має бути принаймні вдвічі більша за вихідну частоту. Практичні міркування обмежують фактичну найвищу вихідну частоту приблизно до  $1/3$  тактової частоти. На рисунку 5 показаний спектр сигналу на виході ЦАП в DDS-системі, в якій вихідна частота становить 30 МГц, а тактова –

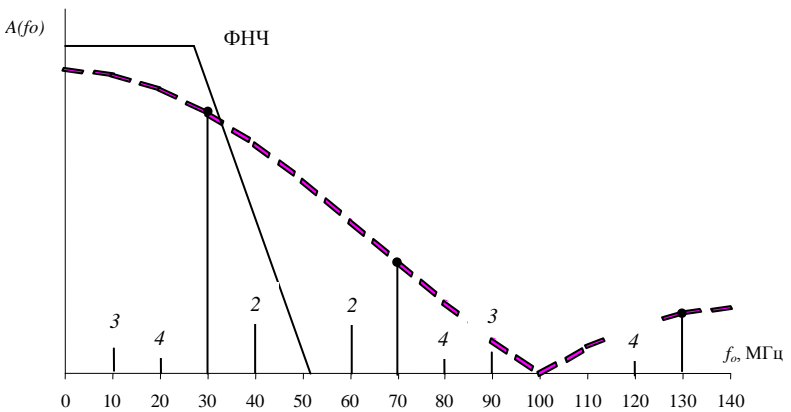


Рисунок 5 – Посадження спектрів в DDS-системі

100 МГц. За ЦАП має бути встановлено згладжувальний фільтр для видалення дзеркальної частоти.

Нормалізований амплітудний відгук на виході ЦАП (перед фільтром) має нулі на тактовій і кратних їй частотах:

$$A(f_0) = \frac{\sin\left(\frac{\pi f_0}{f_c}\right)}{\frac{\pi f_0}{f_c}}, \quad (3)$$

де  $f_o$  – вихідна частота, а  $f_c$  – тактова частота.

Спад частотної характеристики виникає через те, що на виході ЦАП присутня не послідовність імпульсів нульової ширини (як в досконалому імпульсному елементі), а прямокутні імпульси, ширина яких дорівнює зворотній величині частоти вибірки.

На відміну від базової ФАПЧ-системи, вищі гармоніки основної вихідної частоти в DDS-системі попадають в смугу пропускання через поєднання спектрів і не можуть бути видалені згладжувальним фільтром. Розміщення перших чотирьох гармонік показано на рисунку 5.

Основними недоліками апаратно-програмної реалізації синтезу частоти слід вважати підвищену складність, вартість, енергоспоживання і габарити системи (порівняно з програмно-апаратним способом). Отже, основні напрямки застосування – в складі відносно потужних та дорогих систем (обчислювальні комплекси, промислові (невбудовані) контролери, радіосистеми). Найбільший ефект апаратно-програмна реалізація може дати при використанні в складі дослідницьких комплексів, АРМ і т.п. [4].

## Висновки

1. Розглянуто чотири способи побудови задавачів частоти для електронних систем з програмним керуванням. Проаналізовано переваги та недоліки кожного з способів при реалізації системи керування на ОМК.

2. Найбільш перспективним для економічно ефективних систем слід вважати *програмно-апаратну* реалізацію, яка спирається на резидентні апаратні засоби ОМК.

3. Для дослідницьких та вимірювальних приладів найбільш доцільним є використання *апаратно-програмного* способу прямого цифрового синтезу частоти із застосуванням спеціалізованих мікросхем.

## ЛІТЕРАТУРА

1. R.E. Best. Phase-Locked Loops/ McGraw-Hill. – New York, 1984.
2. F.M. Gardner. Phaselock Techniques. 2nd Edition/ John Wiley. – New York, 1979.
3. Walt Kester. High Speed DACs and DDS Systems// [www.analog.com](http://www.analog.com).
4. В.П. Войтенко. Цифровий регулятор квазирезонансного преобразователя на базі мікроконтроллера// Техн. електродинаміка. Тем. випуск "Силова електроніка та енергоефективність". – 2002, Ч.2.– С. 74 – 77.